



TUGAS AKHIR - TM 141585

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SUDUT
PENEMPATAN PLAT DATAR PENGANGGU DI DEPAN
RETURNING BLADE TERHADAP PERFORMA TURBIN
ANGIN TIPE *SAVONIUS***

**“Studi Kasus Untuk Rasio Panjang Plat Pengganggu Relatif
Terhadap Diameter Sudu Turbin ($L/d = 1,3054$)”**

AINUN NADHIFAH
NRP. 2111 100 027

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TM 141585

**EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF
DISTURBANCE PLATE ANGLE IN FRONT OF
RETURNING BLADE OF SAVONIUS WIND TURBINE TO
THE TURBINE'S PERFORMANCE**

**“Study Case For the Ratio of the Disturbance's Plate Length
Relative to the Turbine Blade's Diameter ($L/d = 1,3054$)”**

**AINUN NADHIFAH
2111 100 027**

**Supervisor
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Industrial Faculty of Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016**

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI
SUDUT PENEMPATAN PLAT DATAR
PENGANGGANGU DI DEPAN *RETURNING BLADE*
TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN
*SAVONIUS***

“Studi kasus untuk rasio panjang plat pengganggu relatif
terhadap diameter sudu turbin ($L/d = 1,3054$)”

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

AINUN NADHIFAH
NRP. 2111 100 027

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA(Pembimbing)
NIP. 19600129 198701 1 001
2. Dr. Wawan Aries Widodo, S.T, M.T(Penguji II)
NIP. 19710405 199702 1 001
3. Dr. Ir. Heru Mirmanto, M.T(Penguji II)
NIP. 19620216 199512 1 001
4. Dedy Zulhidayat Noor, S.T, M.T, P.hD.(Penguji III)
NIP. 19751206 200501 1 002

SURABAYA
JULI, 2016



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena hanya berkat Rahmat dan Hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul: **STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI SUDUT PENEMPATAN PLAT DATAR PENGANGGU DI DEPAN RETURNING BLADE TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN TIPE SAVONIUS**. (Studi kasus untuk rasio panjang plat pengganggu relatif terhadap diameter sudu turbin ($L/d=1,3054$)).

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi syarat kelulusan pendidikan pada Sarjana S-1 Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari keberhasilan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari peranan dan kerjasama dari berbagai pihak. Untuk itu pada kesempatan ini, penulis mengucapkan banyak terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada:

1. Kedua Orang Tua penulis, beserta seluruh keluarga besar yang tanpa lelah memberikan semangat dan motivasi agar penulis dapat segera menyelesaikan kewajiban di kampus.
2. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA. selaku dosen pembimbing yang terus memberikan pembelajaran dan ilmu yang mudah-mudahan bermanfaat bagi nusa dan bangsa.
3. Wira Ashari, sahabat terbaik yang ikut jatuh bangun membantu penyelesaian tugas akhir ini.
4. Teman-teman seperjuangan Mesin ITS Autosport beserta mas-mas baik yang telah meninggalkan kampus tercinta maupun yang masih sama-sama berjuang agar bisa segera terbebas dari kampus.
5. Warga laboratorium mekanika dan mesin-mesin fluida beserta segenap isinya termasuk geng revisi dan geng sidang yang saling lempar *support* beserta cemooh-nya.

6. Semua sahabat dan teman yang namanya tidak dapat saya sebutkan satu per satu. Terima kasih atas doa dan *support*-nya selama ini. *I couldn't do it without you, guys.*

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan Tugas Akhir ini masih terdapat banyak kekurangan, oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi didapatkan kesempurnaan. Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi kita semua. Amiin.

Surabaya, Juli 2016

Penulis

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SUDUT
PENEMPATAN PLAT DATAR PENGANGGU DI DEPAN
RETURNING BLADE TERHADAP PERFORMA TURBIN
ANGIN TIPE SAVONIUS**

“Studi kasus untuk rasio panjang plat pengganggu relatif terhadap
diameter sudu turbin ($L/d = 1,3054$)”

Nama Mahasiswa : Ainun Nadhifah
NRP : 2111 100 027
Jurusan : Teknik Mesin FTI – ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

Abstrak

Salah satu sumber energi terbesar yang paling banyak digunakan adalah energi fosil. Meski penggunaan energi fosil membawa dampak yang kurang baik bagi lingkungan. Untuk mengatasi ketergantungan terhadap energi fosil, diperlukan suatu pengembangan yang konvensional dan konservatif mengenai sumber energi yang terbarukan. Salah satu pemanfaatan sumber energi terbarukan yang berpotensi untuk dikembangkan adalah sumber energi angin. Turbin angin *Savonius* adalah salah satu jenis turbin angin yang sangat ideal digunakan pada daerah yang memiliki potensi energi angin seperti Indonesia. Pada dasarnya, turbin *Savonius* dapat berputar karena timbulnya perbedaan gaya *drag* yang ditimbulkan oleh sudu-sudunya, yakni sudu *advancing* dan *returning*. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan performa dari turbin angin *Savonius* dengan menempatkan suatu plat pengganggu di depan sudu *returning* dari turbin tersebut.

Demi meningkatkan performa turbin *Savonius* yang memiliki diameter (d) = 60 mm dan tinggi (h) = 80 mm, dan plat pengganggu dengan lebar 78,324 mm dan tinggi 150 mm yang diletakkan di depan sudu *returning* dari turbin tersebut. Plat pengganggu tersebut diletakkan pada sudut yang divariasikan yakni sebesar $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$. Eksperimen ini dilakukan pada *wind tunnel* dengan jenis *subsonic open circuit* dengan total panjang

1780 mm dan suatu *test section* sebesar 660 mm x 660 mm. Kecepatan *free stream* udara dapat ditetapkan pada 8,85 m/s, 11,07 m/s, 13,28 m/s dimana setara dengan bilangan Reynolds pada $Re = 6.0 \times 10^4$, 7.5×10^4 , 9.0×10^4 (berdasarkan panjang karakteristik turbin $L = 2d - a$, dimana a merupakan panjang *overlap* diantara kedua sudu turbin). Kecepatan angin diukur dengan menggunakan *pitot static tube* yang tersambung dengan *inclined manometer*. Putaran yang dihasilkan turbin diukur dengan menggunakan Tachometer OMEGA seri HHT-12. Torsi statis diukur dengan menggunakan Torquemeter LUTRON seri TQ-8800, sementara daya output dari turbin ditentukan dengan cara mengukur tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator yang telah terhubung dengan poros dari turbin Savonius.

Hasil yang didapatkan dari eksperimen ini menunjukkan bahwa penempatan plat pengganggu dapat meningkatkan performa dari turbin angin *Savonius*. Didapatkan peningkatan putaran turbin, torsi statis, serta *coefficient of power* dibandingkan dengan turbin angin *Savonius* tanpa pengganggu. Pada bilangan Reynolds (Re) = 60.000, dengan sudut penempatan plat (θ) = 40° merupakan konfigurasi paling optimum dalam meningkatkan performa dari turbin angin *Savonius*. Dimana didapatkan putaran dari turbin meningkat sebesar 2,63 kali dan *coefficient of power* meningkat menjadi 4 kali lipat dibandingkan pada turbin angin *Savonius* tanpa penghalang.

(Key Word : Performa Turbin Savonius, Plat Penghalang, Variasi Sudut Plat Penghalang)

**EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF
DISTURBANCE'S PLATE ANGLE IN FRONT OF
RETURNING BLADE OF SAVONIUS' WIND TURBINE
TO THE TURBINE'S PERFORMANCE**

“Study case for the ratio of disturbance's plate length relative to
the turbine blade's diameter (L/d) = 1,3054”

Student's Name	: Ainun Nadhifah
NRP	: 2111100027
Departement	: Mechanical Engineering, FTI – ITS
Supervisor	: Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

Abstract

One of the energy sources used widely is fossil energy. Unfortunately, the use of fossil energy also have a negative impact on the environment. To overcome the dependant on fossil energy, it is necessary to do the conventional, conservative, and development of sources of renewable energy. One of the utilization of renewable energy, which currently has great potential to be developed is the wind energy. Savonius wind turbine is one of the types of wind turbine which is ideal for regional with wind energy potential such as in Indonesia. In principle, Savonius turbine works caused by the difference of the drag force generated by its blades, advancing and returning blade. The aim of this study is improving the performance of Savonius wind turbine by placing an obstacle plate in front of returning blade of the turbine.

In order to increasing the performance of Savonius wind turbine having a diameter (D) of 60 mm and height (h) of 80 mm, a plate having a width of 78,324 mm and a height of 150 mm is used as a disturbance located in front of returning blade of turbine. This disturbance is located in various angle of $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$. The experiments were carried out in a subsonic open circuit wind tunnel. This facility has a 1780 mm long, with test section 660 mm x 660 mm. The free stream velocity of wind tunnel could

be adjusted to 8,85 m/s, 11,07 m/s, 13,28 m/s, corresponding respectively to Reynolds number $Re = 6.0 \times 10^4$, 7.5×10^4 , 9.0×10^4 (based on equivalent length of $L = 2d - a$, where a is the width of overlap of the two turbine blades, and the free stream velocity). The velocity of wind is measured using a pitot-static tube connected to the inclined manometer. The rotation of turbine is measured by Tachometer OMEGA HHT-12 series. The static torque is measured by Torquemeter LUTRON TQ-8800 series, and finally the power output of turbine is determined by the measuring of voltage and electric current resulted by generator connecting to the shaft of Savonius turbine.

This experimental result shows that placing the obstacle plate can improve the performance of the Savonius turbine. It is showed by the increasing of the rotation, the static torque, and the coefficient of power, compared with the Savonius wind turbine without any obstacle. For Reynolds Number (Re) = 60.000, the position of plate at $(\theta) = 40^\circ$ is the most effective to improve the performance of the Savonius wind turbine. Where the rotation of turbine is reached about 2,63 times greater and the coefficient of power becomes 4 times greater than if the Savonius wind turbine without any obstacle.

(Key Word : Savonius' Turbine Performance, Disturbance's Plate, Disturbance's Plate Angle Variation)

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Abstrak	iv
Kata Pengantar	viii
Daftar Isi	x
Daftar Gambar	xii
Daftar Tabel	xiv
Daftar Simbol dan Satuan	xv
BAB I Pendahuluan	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Batasan Masalah	5
BAB II Tinjauan Pustaka	7
2.1. Dasar Teori	7
2.1.1. Aliran Laminar dan Turbulen	7
2.1.2. Bilangan Reynolds	7
2.1.3. Koefisien Drag	8
2.1.4. Wind Turbine	9
2.1.5. Turbin Angin Savonius	10
2.1.6. Perhitungan Performa Turbin	11
2.2. Penelitian Terdahulu	14
BAB III Metodologi Penelitian	23
3.1. Parameter yang Diukur	23
3.2. Analisa Dimensi	24
3.3. Metode Eksperimen	27
3.4. Metode Pengukuran Daya	33
3.5. Prosedur Penelitian	34
3.6. Flowchart Penelitian	36
BAB IV Analisa dan Pembahasan	37
4.1. Data Penelitian	37
4.2. Contoh Perhitungan	40

4.3.	Analisa Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Penghalang	42
4.4.	Analisa Putaran Turbin Angin Savonius dengan Penambahan Plat Pengganggu	47
4.5.	Analisa Torsi Statis Turbin Angin Savonius dengan Penambahan Plat Pengganggu	50
4.6.	Analisa <i>Coefficient of Power</i> Turbin Angin Savonius dengan Penambahan Plat Pengganggu	53
4.7.	Analisa <i>Coefficient of Power</i> Turbin Angin Savonius Terhadap <i>Tip Speed Ratio</i>	55
4.8.	Analisa <i>Coefficient of Power</i> Turbin Angin Savonius Pada Berbagai Bilangan Reynolds dengan Penambahan Plat Pengganggu	57
BAB V Penutup		59
5.1.	Kesimpulan	59
5.2.	Saran	59
Daftar Pustaka		
Lampiran		

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Pengaturan variasi panjang penghalang	15
Tabel 3.1 Parameter beserta dimensi primernya	25
Tabel 4.1 Data standar turbin angin Savonius tanpa penghalang..	43

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Penguraian gaya-gaya pada kontur permukaan lengkung	9
Gambar 2.2	Konstruksi turbin angin <i>Savonius</i> konvensional (tampak atas)	11
Gambar 2.3	Desain konvensional turbin angin <i>Savonius</i> (Altan et al, 2008)	15
Gambar 2.4	Desain turbin angin <i>Savonius</i> dengan penghalang (Altan et al, 2008)	16
Gambar 2.5	Pengaturan penempatan rotor pada <i>wind tunnel</i> (Altan et al, 2008)	16
Gambar 2.6	Grafik perbandingan nilai <i>coefficient of power</i> pada pengaturan <i>curtain</i> (Altan et al, 2008)	17
Gambar 2.7	Perbandingan nilai C_p pada berbagai pengaturan <i>curtain</i> (Altan et al, 2008)	18
Gambar 2.8	Perbandingan torsi yang dihasilkan dengan berbagai pengaturan <i>curtain</i> (Altan et al, 2008)	19
Gambar 2.9	Deskripsi skematis dan parameter turbin angin <i>Savonius</i> (Mohamed et al, 2011)	19
Gambar 2.10	Perubahan konfigurasi dan penambahan plat penghalang dapat meningkatkan performa dibanding dengan desain turbin <i>Savonius</i> konvensional (Mohamed et al, 2011)	20
Gambar 2.11	Validasi dari metode komputasi fluida: (atas) <i>torque coefficient</i> , (bawah) <i>power coefficient</i> , keduanya dibandingkan dengan hasil eksperimen turbin angin <i>Savonius</i> konvensional (Mohamed et al, 2011)	21
Gambar 3.1	Skema peralatan penelitian (tampak atas)	23
Gambar 3.2	<i>Wind Tunnel</i> yang digunakan dalam eksperimen ...	28
Gambar 3.3	Konstruksi dasar turbin angin tipe <i>Savonius</i>	29
Gambar 3.4	Konstruksi plat datar pengganggu	30

Gambar 3.5	Tachometer OMEGA seri HHT12	31
Gambar 3.6	Torquemeter LUTRON seri TQ-8800	31
Gambar 3.7	<i>Pitot Tube</i>	32
Gambar 3.8	Multimeter Sanwa Digital tipe CD-771	33
Gambar 3.9	Mekanisme pengukuran daya output	34
Gambar 3.10	<i>Flowchart</i> penelitian	36
Gambar 4.1	Grafik putaran turbin tanpa penghalang fungsi bilangan Reynolds	44
Gambar 4.2	Grafik torsi statis turbin tanpa penghalang fungsi bilangan Reynolds	45
Gambar 4.3	Koefisien daya turbin tanpa penghalang fungsi bilangan Reynolds	46
Gambar 4.4	Grafik putaran turbin berpenghalang dengan fungsi sudut bukaan turbin	48
Gambar 4.5	Grafik perbandingan putaran standar (tanpa penghalang) dengan putaran dengan penambahan penghalang dengan fungsi sudut bukaan (θ)	49
Gambar 4.6	Grafik torsi statis turbin berpenghalang dengan fungsi sudut bukaan plat	50
Gambar 4.7	Grafik perbandingan torsi statis standar (tanpa penghalang) dengan torsi statis dengan penambahan penghalang dengan fungsi sudut bukaan	52
Gambar 4.8	Grafik koefisien daya turbin berpenghalang dengan fungsi sudut bukaan	54
Gambar 4.9	Grafik perbandingan koefisien daya turbin berpenghalang dengan koefisien daya turbin tanpa penghalang dengan fungsi sudut bukaan plat	55
Gambar 4.10	Grafik <i>coefficient of power</i> dengan fungsi <i>tip speed ratio</i>	56
Gambar 4.11	Grafik <i>coefficient of power</i> terhadap bilangan Reynolds	57

DAFTAR SIMBOL DAN SATUAN

Re	bilangan Reynolds/ Reynolds <i>number</i>
ρ	densitas fluida (kg/m^3)
U_∞	kecepatan aliran <i>freestream</i> fluida (m/s)
μ	viskositas dinamik fluida (Ns/m^2)
D	panjang karakteristik (m)
F_D	gaya drag (N)
C_D	koefisien drag
A	luas permukaan turbin (m^2)
E_k	energi kinetik (Watt)
P_w	daya yang dihasilkan turbin (Watt)
v	kecepatan aliran fluida (m/s)
T	torsi yang dihasilkan turbin (Nm)
R	jari-jari turbin (m)
P_T	daya teoritis turbin (Watt)
ω	kecepatan angular turbin (rad/s)
n	putaran yang dihasilkan turbin (RPM)
C_{oP}	<i>coefficient of power</i>
λ	<i>tip speed ratio</i>
θ	sudut penempatan turbin ($^\circ$)
L	panjang plat datar pengganggu (m)
d	diameter sudu turbin (m)
S	proyeksi panjang plat datar terhadap tegak lurus arah aliran fluida (m)
C	jarak antara pusat sudu turbin dengan plat pengganggu (m)
t	tinggi plat datar pengganggu (m)
H	tinggi turbin (m)
a	panjang <i>overlap</i> turbin (m)
V	tegangan yang dihasilkan generator listrik (Volt)
i	arus yang dihasilkan generator listrik (Ampere)



BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dunia teknologi saat ini sedang dalam tahap berlomba-lomba mencapai tingkat yang paling mendekati kesempurnaan dengan tujuan meningkatkan taraf hidup masyarakat dunia. Hal ini berlaku pada seluruh disiplin ilmu, tak terkecuali bidang mekanika fluida. Namun untuk mencapai titik kesempurnaan yang diinginkan, energi akan selalu dibutuhkan dalam setiap riset-riset yang dilakukan. Hingga saat ini, energi fosil merupakan sumber energi terbesar yang digunakan oleh penduduk dunia. Namun tidak selamanya energi fosil dapat digunakan, mengingat penggunaan energi fosil belakangan ini diketahui tidak akan dapat bertahan untuk selamanya, sangat merusak lingkungan, dan dapat mengancam keberlangsungan hidup makhluk hidup di bumi.

Untuk itulah berbagai macam penelitian dilakukan untuk mencari pengganti energi fosil sebagai sumber energi utama, dan diketahui energi angin merupakan salah satu alternatif sumber energi yang berpotensi. Prinsip kerja memanen energi yang bersumber dari energi angin adalah dengan menggunakan turbin dan generator listrik, dimana energi angin akan memutar turbin angin. Putaran tersebut ditransmisikan ke generator listrik untuk dihasilkan energi listrik sehingga terjadi perubahan energi dari energi mekanik menjadi energi listrik.

Berdasar arah putarannya, turbin angin dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu *Horizontal Axis Wind Turbine* dan *Vertical Axis Wind Turbine*. Salah satu contoh *Vertical Axis Wind Turbine* adalah turbin angin *Savonius* yang pertama kali ditemukan oleh Sigurd Johannes Savonius pada tahun 1922. Konsep dari turbin angin Savonius ini adalah tabung silinder yang dipotong menjadi dua bagian sama besar dan disatukan menjadi seperti huruf S. Sudu turbin angin Savonius (*Savonius Blade*) ini ada dua, yakni *advancing blade* dan *returning blade*. Perbedaan diantara keduanya adalah *advancing blade* memiliki cekungan di



bagian dalam sudu turbin dan tegak lurus dengan arah datang aliran, sedangkan *returning blade* adalah pada sisi sebaliknya.

Wind turbine ini dapat berputar akibat adanya perbedaan gaya *drag* dari kedua sudu dimana selisih gaya tersebut akan menghasilkan torsi yang jika dikalikan dengan kecepatan angular dari turbin akan menghasilkan daya turbin. Sehingga, untuk mendapatkan daya turbin angin yang lebih besar, maka dibutuhkan selisih gaya *drag* yang besar pula. Maka untuk mendapatkan nilai gaya *drag* yang kecil di daerah *returning blade*, diletakkan pengganggu berupa plat datar yang dipasang tepat di depan *returning blade*. Plat tersebut akan digerakkan ke arah *advancing blade* dengan besar sudut kemiringan yang dapat divariasikan.

Penelitian yang pernah dilakukan oleh **B. D. Altan et al** (2008) mengenai peningkatan performa rotor *Savonius* dengan pengganggu berupa plat dengan sudut kemiringan paling optimum sebesar $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$. Dengan pengaturan tersebut performa rotor mengalami peningkatan yang signifikan yaitu sebesar 38% pada nilai daya yang dihasilkan.

Sedangkan penelitian serupa dilakukan oleh **M. H. Mohamed et al** (2011) yaitu dengan mensimulasikan turbin angin tipe *Savonius* ini melalui *software* metode komputasi fluida yaitu Fluent dengan analisa turbulensi. Hasil yang didapat oleh penelitian ini adalah performa turbin paling optimum didapatkan pada λ (*speed ratio*) sebesar 1,4 yaitu meningkat sebesar 75,4%. Sedangkan pada rentang λ diantara 0,3 hingga 1,4 didapat peningkatan performa paling sedikit sebesar 30%.

Penelitian yang telah dilakukan ini masih dalam upaya untuk meningkatkan performa turbin *Savonius* dengan menggunakan pengganggu berupa plat datar yang diletakkan di depan *returning blade*, dengan sudut kemiringan 0° sampai dengan 90° dengan kenaikan sebesar 5° pada bilangan Reynolds $6,0 \times 10^4$; $7,5 \times 10^4$ dan $9,0 \times 10^4$.



1.2. Rumusan Masalah

Penelitian ini dilakukan pada *wind turbine Savonius* dimana turbin jenis ini terdiri atas dua jenis yaitu *advancing blade* dan *returning blade*. Perbedaan dari kedua *blade* ini terletak pada bagian cekungan dalam sudu turbin. *Advancing blade* mempunyai cekungan pada sudu yang mengarah kedalam searah dengan arah angin, dimana *returning blade* memiliki sudu yang melembung searah dengan arah aliran.

Turbin angin *Savonius* akan berputar jika gaya *drag* yang terdapat pada *advancing blade* lebih besar dibanding *returning blade*. Adanya perbedaan gaya *drag* pada kedua sisi sudu ini menyebabkan timbulnya nilai torsi yang berbeda pula. Pengalihan nilai perbedaan torsi dengan kecepatan angular turbin akan menghasilkan daya turbin.

Semakin besar perbedaan gaya *drag* diantara kedua sudu tersebut, maka semakin besar pula perbedaan torsi. Apabila pada *returning blade* diberikan penghalang berupa plat, maka ada kemungkinan hal ini akan memperkecil gaya *drag* yang mengarah pada *returning blade*, hingga menyebabkan nilai torsi pada *returning blade* menjadi lebih kecil. Kemungkinan lainnya adalah pada saat titik kemiringan tertentu diharapkan adanya aliran yang mengarah pada *advancing blade*, sehingga dapat memperbesar nilai torsi pada *advancing blade*. Karena kedua hal tersebut menyebabkan perbedaan nilai torsi pada *advancing blade* dan *returning blade* akan semakin besar dan daya yang dibangkitkan juga semakin besar pula.

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *wind turbine* tipe *Savonius* yang diberi pengganggu berupa plat datar berbahan *acrylic* pada *returning blade*, yang divariasikan sudut kemiringannya dengan sumbu horizontal yang tegak lurus dengan arah aliran angin. Hipotesa awal dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Plat datar diletakkan di depan *returning blade* sebagai pengganggu efektif dalam mengganggu *Savonius wind turbine*. Akibat pengganggu ini diperkirakan gaya *drag*



pada *returning blade* akan mengecil. Tentunya hal ini akan meningkatkan performa dari turbin angin, diantaranya adalah nilai putaran, torsi statis dan koefisien daya.

2. Variasi sudut kemiringan plat datar di depan *returning blade* dari *wind turbine* akan menyebabkan aliran lebih banyak mengarah pada *advancing blade* sehingga diduga hal ini akan mempengaruhi kenaikan gaya *drag* yang diterima oleh *advancing blade*, sehingga menimbulkan peningkatan performa dari turbin angin tersebut.

Untuk membuktikan kebenaran hipotesa diatas maka dilakukan penelitian dengan menggunakan *wind turbine* tipe *Savonius* yang memiliki diameter sudu (d) = 60 mm dan pengganggu berupa plat berbahan *acrylic* dengan panjang (L) = 78,324 mm, tinggi (T) = 150 mm dan variasi sudut kemiringan sebesar 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° , 50° , 55° , 60° , 65° , 70° , 75° , 80° , 85° , dan 90° dan bilangan *Reynolds* = $6,0 \times 10^4$; $7,5 \times 10^4$ dan $9,0 \times 10^4$.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan diadakannya penelitian ini adalah guna mendapatkan performa yang paling optimal dari *wind turbin* tipe *Savonius* dengan menganalisa pengaruh variasi sudut kemiringan antara *returning blade* dengan plat penghalang nilai perbandingan (L/d) sebesar 1,3054 dengan mengukur:

1. Putaran dari turbin angin *Savonius* saat diberi aliran udara dengan bilangan *Reynolds* sebesar $6,0 \times 10^4$, $7,5 \times 10^4$ dan $9,0 \times 10^4$.
2. Torsi statis dari turbin angin *Savonius* saat diberi aliran udara dengan bilangan *Reynolds* sebesar $6,0 \times 10^4$, $7,5 \times 10^4$ dan $9,0 \times 10^4$.
3. Nilai tegangan dan hambatan dari generator listrik untuk menghitung nilai koefisien daya yang dihasilkan.



1.4. Batasan Masalah

Pada penelitian diperlukan beberapa batasan masalah, adapun batasan masalah tersebut adalah:

1. Fluida yang mengalir adalah udara dalam kondisi aliran *steady*, *incompressible*, dan *uniform* pada sisi *upstream* dengan bilangan *Reynolds* yang telah ditentukan sebesar $6,0 \times 10^4$, $7,5 \times 10^4$ dan $9,0 \times 10^4$.
2. Analisa penelitian dilakukan turbin angin jenis *Savonius* dengan nilai perbandingan $(L/d) = 1,3054$ dan penganggu berupa plat datar yang diletakkan di depan *returning blade* berupa *acrylic* dengan panjang $(L) = 78,324$ mm, tinggi $(T) = 150$ mm.
3. Variasi sudut kemiringan antara *returning blade* dengan plat penghalang yang digunakan adalah sebesar 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° , 50° , 55° , 60° , 65° , 70° , 75° , 80° , 85° , dan 90° .
4. Analisa aliran dua dimensi.
5. Kemungkinan terjadinya perpindahan panas dapat diabaikan.



Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Dasar Teori

2.1.1. Aliran Laminar dan Turbulen

Aliran laminar dan turbulen dibedakan berdasarkan karakteristik internal aliran. Umumnya klasifikasi ini bergantung pada gangguan-gangguan yang dapat dialami suatu aliran yang mempengaruhi gerak partikel-partikel fluida tersebut. Apabila aliran mempunyai kecepatan relatif rendah atau fluidanya sangat *viscous*, gangguan yang mungkin dialami medan aliran akibat getaran, ketidakteraturan permukaan batas dan sebagainya, relatif lebih cepat teredam oleh viskositas fluida dan aliran fluida tersebut disebut dengan aliran laminar. Saat gangguan yang timbul semakin besar hingga mencapai kondisi peralihan (*transition state*) pada kecepatan aliran yang bertambah besar atau efek viskositas fluida yang mulai berkurang. Terlampauinya kondisi peralihan menyebabkan sebagian gangguan tersebut menjadi semakin kuat, dimana partikel bergerak fluktuatif atau acak dan terjadi pencampuran gerak partikel antara lapisan-lapisan yang berbatas atau disebut dengan aliran turbulen.

Perbedaan mendasar antara aliran laminar dan turbulen adalah gerak olakan atau ketidakteraturan pada aliran turbulen jauh lebih efektif dalam pengangkutan massa serta momentum fluida dibandingkan dengan gerak molekuler. Kondisi aliran laminar dan turbulen dapat dinyatakan dengan bilangan Reynolds.

2.1.2. Bilangan Reynolds (Reynolds Number)

Kondisi aliran laminar atau turbulen dapat dinyatakan dengan bilangan Reynolds untuk aliran *incompressible*. Bilangan Reynolds adalah suatu bilangan tak berdimensi yang merupakan perbandingan antara gaya inersia bodi terhadap gaya geser yang ditimbulkan aliran fluida.

$$Re = \frac{\text{Gaya Inersia}}{\text{Gaya geser}} \quad (2.1)$$



dimana,

$$\text{Gaya inersia} = p \times A = \rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2 \quad (2.2)$$

$$\text{Gaya geser} = \tau \times A = \left(\frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L} \right) \quad (2.3)$$

sehingga,

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2}{\left(\frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L} \right)} = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot L}{\mu} \quad (2.4)$$

dimana,

ρ : densitas fluida

U_{∞} : kecepatan aliran *free stream* fluida

μ : viskositas dinamis fluida

D : panjang karakteristik, dalam penelitian ini digunakan diameter turbin ($D = 2d - a$)

sehingga,

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot D}{\mu} \quad (2.5)$$

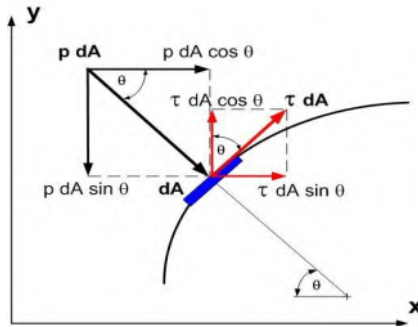
2.1.3. Koefisien Drag (C_D)

Sebuah benda yang dialiri oleh suatu aliran *viscous* yaitu aliran dimana viskositas atau kekentalan suatu fluida sangat berpengaruh sehingga menghasilkan tegangan geser. Aliran *incompressible* adalah aliran dimana variasi densitas fluida yang mengalir dapat diabaikan, sehingga akan mengalami gaya-gaya aerodinamika. Gaya-gaya tersebut dihasilkan karena adanya tekanan dan gaya geser pada permukaan benda. Gaya dengan arah sejajar horizontal terhadap aliran disebut dengan gaya *drag*, sedangkan gaya dengan arah sejajar vertikal terhadap aliran disebut gaya *lift*.

Gaya *drag* yang terjadi dapat berupa *skin friction drag* (F_{Df}) yaitu gaya hambat yang menyinggung permukaan secara tangensial yang timbul akibat adanya viskositas (tegangan geser antara fluida dan permukaan benda), dan *pressure drag* (F_{Dp}) yaitu gaya hambat yang tegak lurus terhadap permukaan benda yang timbul akibat adanya tekanan fluida. Resultan antara *friction drag* dan *pressure drag* disebut sebagai *total drag*.



Berikut adalah penguraian gaya-gaya pada kontur permukaan lengkung terhadap sumbu-x dan sumbu-y:



Gambar 2.1 Penguraian gaya-gaya pada kontur permukaan lengkung

Komponen gaya yang searah sumbu-x adalah gaya *drag* sedangkan gaya yang searah sumbu-y adalah gaya *lift* sehingga gaya *drag* yang terbentuk dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$F_D = F_{Dp} + F_{Df} \quad (2.6)$$

$$F_D = \int \cos \theta \cdot (\rho \cdot dA) + \int \sin \theta \cdot (\tau \cdot dA) \quad (2.7)$$

Pada umumnya gaya *drag* sering diekspresikan dalam bilangan tak berdimensi yaitu koefisien *drag* (C_D) yang didefinisikan sebagai berikut:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho \cdot U_\infty^2 \cdot A} \quad (2.8)$$

2.1.4. Turbin Angin (*Wind Turbine*)

Turbin angin adalah suatu alat yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik dengan prinsip konversi energi dan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui yaitu angin. Meski pembangunan turbin angin masih belum dapat menyaingi pembangkit listrik konvensional yang masih menggunakan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui seperti batubara atau minyak bumi, namun turbin angin masih tetap dalam proses pengembangan untuk mengatasi permasalahan



dunia saat ini yaitu semakin sedikitnya persediaan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui.

Turbin angin dapat dibagi menjadi 2 tipe berdasarkan arah sumbunya yaitu turbin angin sumbu horizontal (TASH) dan turbin angin sumbu vertikal (TASV). Karena dalam penelitian kali ini menggunakan turbin angin sumbu vertikal maka turbin angin sumbu horizontal tidak dibahas lebih lanjut.

Turbin angin sumbu vertikal (TASV) memiliki poros/sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus. Kelebihan utama turbin angin jenis ini adalah tidak harus diarahkan ke angin agar menjadi efektif. Kelebihan ini menjadi sangat berguna pada daerah-daerah dengan arah angin yang bervariasi.

Dengan poros/sumbu vertikal, generator serta *gearbox* dapat ditempatkan di dekat tanah sehingga akan sangat mempermudah proses pemeliharaan. Namun hal ini juga menimbulkan kelemahan yaitu tenaga putaran yang dihasilkan sering kali berfluktuasi. Akibatnya berbagai permasalahan terkait getaran pun timbul seperti keausan *bearing* yang dapat menyebabkan meningkatnya biaya pemeliharaan serta memperpendek *lifetime* dari turbin angin tersebut.

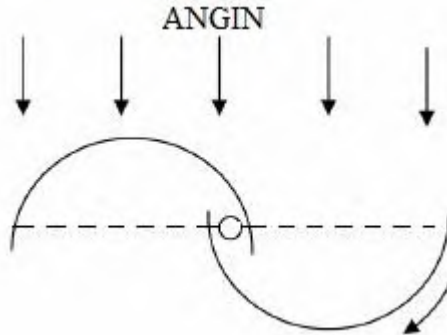
2.1.5. Turbin Angin Savonius

Turbin angin *Savonius* pertama kali ditemukan oleh insinyur asal Finlandia, Sigurd J. Savonius pada tahun 1922. Turbin angin sumbu vertikal terdiri dari dua sudu berbentuk setengah silinder (*elips*) yang dirangkai sehingga menyerupai bentuk huruf 'S' dengan salah satu sisi berbentuk cembung dan sisi yang lain berbentuk cekung yang dilalui angin. Konstruksi turbin angin *Savonius* konvensional dijelaskan dalam gambar 2.2.

Turbin angin *Savonius* merupakan salah satu pembangkit dengan sumber energi alternatif yang dapat diperbaharui dimana angin (energi kinetik) akan meniup kincir angin sehingga sudu dan rotor bergerak. Sudu dan rotor selanjutnya akan berputar pada porosnya yang menyebabkan putaran tersebut dapat mempengaruhi kumparan stator yang berada di bawah rotor.



Dengan rotor berisi magnet dan stator berupa kumparan (generator) maka akan timbul perubahan energi mekanik menjadi energi listrik.



Gambar 2.2 Konstruksi turbin angin *Savonius* konvensional (tampak atas)

Berdasarkan prinsip aerodinamis, rotor turbin ini memanfaatkan gaya *drag* saat mengekstrak energi angin dari aliran angin yang melalui sudu turbin. Koefisien *drag* pada permukaan cekung akan lebih besar dibanding pada permukaan cembung, hal inilah yang menyebabkan rotor berputar. Setiap turbin angin yang memanfaatkan gaya *drag* yang disebabkan oleh aliran angin memiliki efisiensi yang terbatas dikarenakan kecepatan putaran sudu tidak bisa melebihi kecepatan angin. Namun turbin angin *Savonius* ini tidak membutuhkan energi awal untuk dapat memulai rotor untuk berputar.

2.1.6. Perhitungan Performa Turbin

Prinsip utama dari turbin angin adalah kemampuan untuk memanfaatkan energi angin dan mengonversinya dari energi kinetik menjadi energi mekanik. Performa dari turbin angin secara umum ditunjukkan oleh tiga indikator utama, yakni daya, torsi dan *thrust* yang bervariasi dengan kecepatan angin. Daya menentukan jumlah energi angin yang ditangkap oleh rotor, torsi yang dihasilkan menentukan desain komponen yang akan



digerakkan oleh rotor, dan *thrust* memiliki pengaruh besar pada desain struktur menara.

2.1.6.1. Perhitungan Daya Turbin Teoritis

Angin merupakan udara yang bergerak disebabkan oleh adanya perbedaan tekanan. Udara akan mengalir dari daerah bertekanan tinggi ke daerah bertekanan lebih rendah. Perbedaan tekanan udara ini dipengaruhi oleh sinar matahari. Daerah yang banyak terkena paparan sinar matahari akan memiliki temperatur yang lebih tinggi daripada daerah yang sedikit terkena paparan sinar matahari. Menurut hukum gas ideal, temperatur berbanding terbalik dengan tekanan, dimana temperatur yang tinggi akan memiliki tekanan yang rendah, dan sebaliknya.

Udara yang memiliki massa (m) dan kecepatan (v) akan menghasilkan energi kinetik sebesar:

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2.9)$$

Massa udara yang bergerak dalam satuan waktu dengan kerapatan ρ , yaitu:

$$m = \rho v A \quad (2.10)$$

Sehingga, energi kinetik angin yang berhembus dalam satuan waktu (daya angin) adalah:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v \cdot v^2 \quad (2.11)$$

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.12)$$

dimana:

E_k : energi kinetik (Joule)

P_w : daya angin (Watt)

ρ : massa jenis udara (kg/m^3)

A : luas penampang turbin (m^2)

v : kecepatan udara (m/s)

Besar daya diatas adalah daya yang dimiliki oleh angin sebelum dikonversi atau sebelum melewati turbin angin. Dari daya tersebut tidak semuanya dapat dikonversi menjadi energi mekanik oleh turbin.



2.1.6.2. Perhitungan Daya Turbin Berdasarkan Torsi

Torsi merupakan ukuran kuantitatif dari kecenderungan sebuah gaya untuk menyebabkan atau mengubah gerak rotasi dari suatu benda. Pada turbin, besar torsi bergantung pada kecepatan angin dan sudu turbin serta dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T = F_D \cdot R \quad (2.13)$$

Berdasarkan persamaan sebelumnya, maka Torsi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T = C_D \frac{1}{2} \rho v^2 A R \quad (2.14)$$

dimana:

T : torsi yang dihasilkan dari putaran poros

F_D : gaya *drag* (N)

R : jari-jari turbin (m)

Torsi dengan kecepatan sudut memiliki hubungan dengan daya turbin yang dirumuskan sebagai berikut:

$$P_T = T \cdot \omega \quad (2.15)$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (2.16)$$

$$P_T = C_D \rho v^2 A R \frac{\pi \cdot n}{60} \quad (2.17)$$

dimana:

P_T : daya yang dihasilkan turbin (Watt)

ω : kecepatan angular turbin (rad/s)

n : putaran poros (rpm)

C_D : *coefficient of drag*

v : kecepatan aliran (*freestream*) (m/s)

A : luas penampang (m²)

2.1.6.3. Coefficient of Power

Berdasarkan teori momentum, *coefficient of power* dari turbin harus lebih kecil daripada nilai yang ditentukan oleh Betz's yaitu sekitar 0,593 dan hal tersebut disebabkan oleh adanya *losses* pada mekanisme gerak turbin angin. *Coefficient of power* (C_{OP}) adalah perbandingan antara daya yang dihasilkan secara mekanik pada sudu akibat gaya angin terhadap daya yang dihasilkan oleh



gaya hambat pada aliran udara. Secara matematis, hubungan ini dapat dituliskan:

$$C_{oP} = \frac{P_r}{P_w} \quad (2.18)$$

$$C_{oP} = \frac{C_D \rho v^2 A R \frac{\pi n}{60}}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \quad (2.19)$$

$$C_{oP} = \frac{C_D R \pi n}{30 v} \quad (2.20)$$

Dari persamaan diatas, maka daya riil yng dihasilkan turbin dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_R = C_{oP} \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.21)$$

2.1.6.4. Tip Speed Ratio (TSR)

Tip speed ratio (TSR) merupakan perbandingan antara kecepatan putar turbin terhadap kecepatan angin. TSR biasa dilambangkan dengan λ .

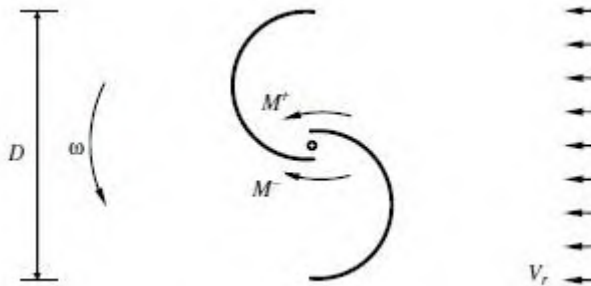
$$\lambda = \frac{\omega R}{v_w} \quad (2.22)$$

dimana:

- λ : *tip speed ratio*
- ω : kecepatan angular turbin (rad/s)
- R : jari-jari turbin (m)
- v_w : kecepatan angin (m/s)

2.2. Penelitian Terdahulu

Eksperimen serupa telah dilakukan oleh **B.D. Altan** yaitu dengan menambahkan suatu *deflector* udara dalam konstruksi turbin angin *Savonius* demi mendapatkan peningkatan performa. Sebelumnya, beliau telah menyatakan bahwa turbin angin tipe *Savonius* ini memiliki *power performance* yang tergolong kecil ($C_p \approx 15\%$) dibandingkan dengan turbin angin sumbu horizontal ($C_p \approx 45\%$) dan tipe *Darrieus* ($C_p \approx 35\%$). Desain konstruksi turbin angin *Savonius* dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Desain konvensional turbin angin *Savonius*
(Altan et al, 2008)

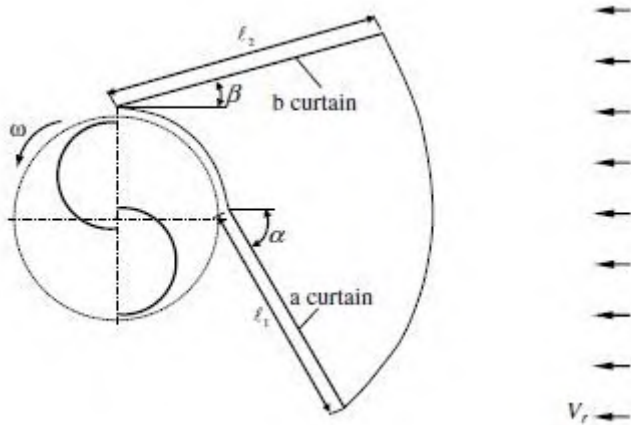
Penambahan suatu penghalang (*deflector*) pada sudut kemiringan tertentu telah dirumuskan berdasarkan tabel berikut:

Tabel 2.1 Pengaturan variasi panjang penghalang

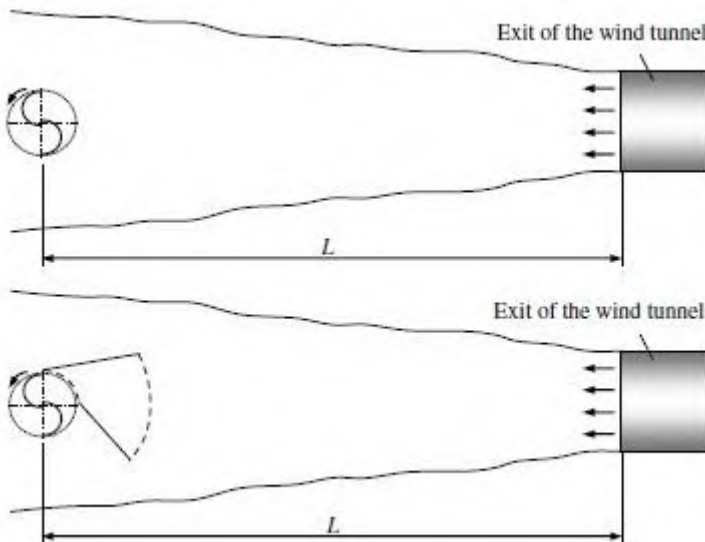
Type of curtain arrangement	Distance ℓ_1 (cm)	Distance ℓ_2 (cm)
Curtain 1	45	52
Curtain 2	34	39
Curtain 3	22	26

sehingga didapatkan konstruksi baru seperti pada gambar 2.4.

Pengaturan lain yang dapat menunjang hasil yang maksimal juga telah dilakukan, seperti contohnya penempatan *Savonius wind rotor* yang ditempatkan pada jarak $L \approx 5m$ sebelum keluaran *wind tunnel*. Hal ini untuk dilakukan untuk mendapatkan aliran yang *uniform*. Pengaturan jarak pada *wind turbine* ini dapat dilihat pada gambar 2.5.



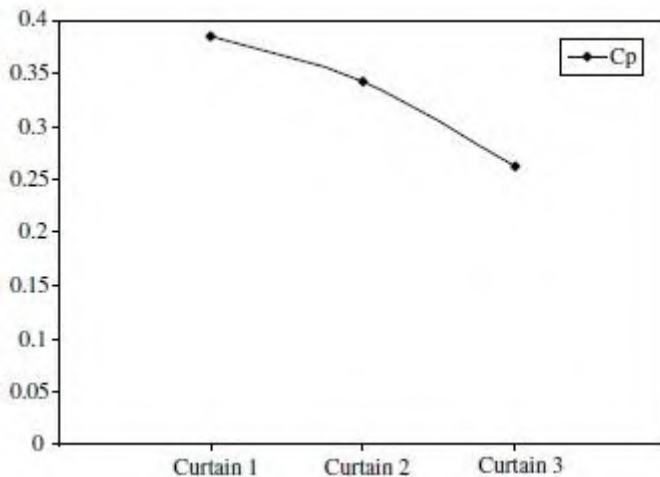
Gambar 2.4 Desain turbin angin *Savonius* dengan penghalang (Altan et al, 2008)



Gambar 2.5 Pengaturan penempatan rotor pada *wind tunnel* (Altan et al, 2008)



Hasil yang didapatkan dari pengaturan penempatan rotor seperti yang tertera pada gambar 2.5 adalah diperolehnya hasil paling maksimal dengan pengaturan penghalang 1 (*curtain 1*). Dengan pengaturan tersebut didapatkan nilai *coefficient of power* terbesar. Hasil percobaan dapat dilihat pada gambar 2.6.



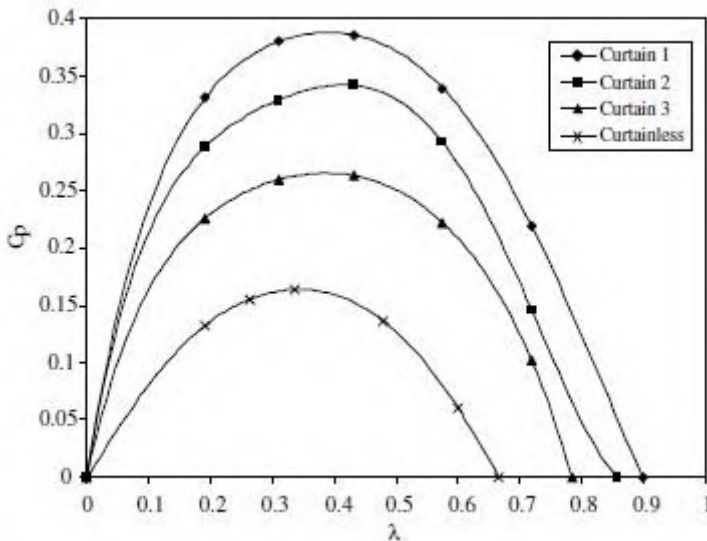
Gambar 2.6 Grafik perbandingan nilai *coefficient of power* pada berbagai pengaturan *curtain* (Altan et al, 2008)

Sehingga didapatkan panjang l_1 dan l_2 yang paling baik performanya, yaitu pada $l_1=45$ dan $l_2=52$ (cm) seperti yang terlihat pada grafik perbandingan di gambar 2.6., adanya pengurangan panjang akan mengakibatkan penurunan nilai *coefficient of power* yang selanjutnya menurunkan performa dari turbin angin tersebut.

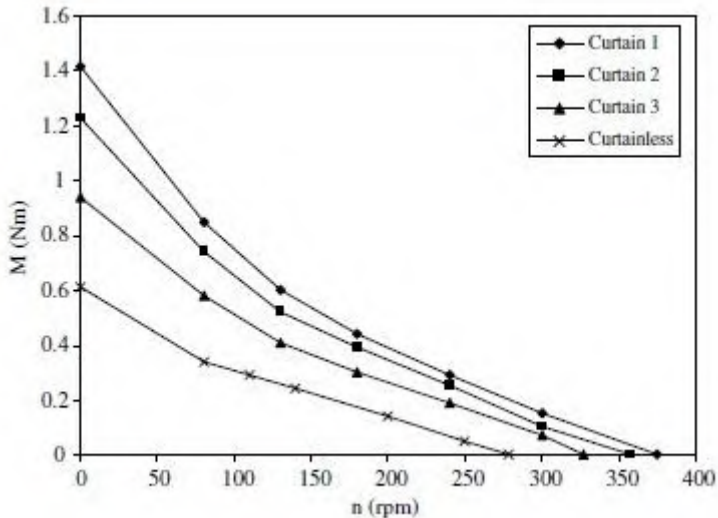
Selanjutnya penelitian ini tetap dilanjutkan untuk mendapatkan sudut kemiringan paling optimal, dan setelah dilakukan percobaan didapatkan sudut kemiringan yang paling optimal adalah pada $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$ dengan pengaturan panjang penghalang *curtain 1*.



Saat pengaturan *curtain* paling optimum digunakan, performa dari turbin angin *Savonius* meningkat sebesar 38% dibandingkan dengan turbin angin *Savonius* yang konvensional. Selain itu, meski pengaturan *curtain* 2 dan 3 memiliki nilai *coefficient of power* yang lebih rendah/ tidak optimum namun nilai *coefficient of power* yang dihasilkan lebih baik dibandingkan dengan turbin angin *Savonius* konvensional yang hanya mendapat 16%. Gambar grafik perbandingan pengaturan pada berbagai *curtain* terhadap nilai *coefficient of power* dan torsi tertera pada gambar 2.7. dan 2.8.

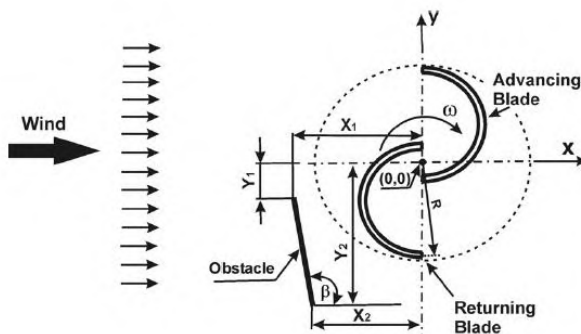


Gambar 2.7 Perbandingan nilai C_p pada berbagai pengaturan *curtain* (Altan et al, 2008)



Gambar 2.8 Perbandingan torsi yang dihasilkan dengan berbagai pengaturan *curtain* (Altan et al, 2008)

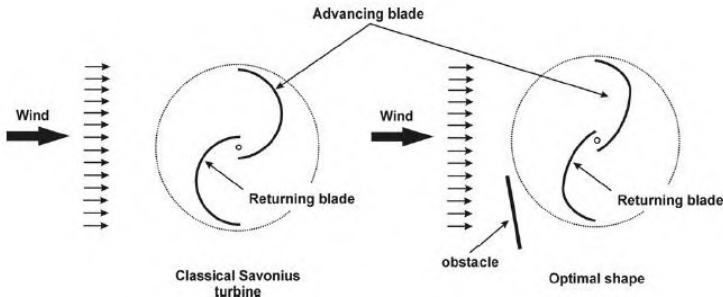
Penelitian serupa yang lain pernah dilakukan oleh **Mohamed et al** pada tahun 2011 yaitu dengan mensimulasikan turbin angin tipe *Savonius* pada *software* metode komputasi fluida yaitu Fluent.



Gambar 2.9 Deskripsi skematis dan parameter turbin angin *Savonius* (Mohamed et al, 2011)

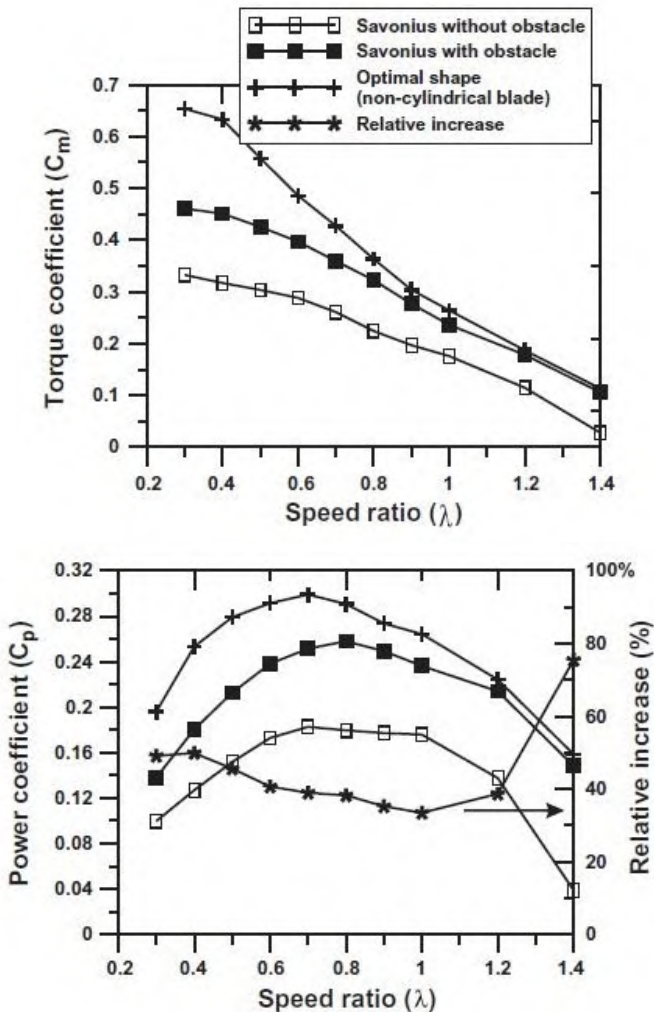


Simulasi yang dilakukan oleh Mohamed et al adalah dengan cara mengubah konfigurasi dari sudu turbin angin serta penambahan plat penghalang seperti pada gambar 2.9. dan 2.10. sehingga diperoleh konfigurasi yang paling optimum. Selain itu nilai λ (*speed ratio*) juga divariasikan pada rentang tertentu.



Gambar 2.10 Perubahan konfigurasi dan penambahan plat penghalang dapat meningkatkan performa dibanding dengan desain turbin *Savonius* konvensional (Mohamed et al, 2011)

Hasil simulasi yang didapatkan dari Fluent dengan menggunakan metode analisa turbulensi *realizable k- ϵ* adalah diperolehnya peningkatan performa sebesar 38,9% pada $\lambda=0,7$ sedangkan pada rentang λ antara 0,3 hingga 1,4 didapat peningkatan performa paling sedikit 30%. Namun peningkatan performa terbaik adalah pada $\lambda=1,4$ yakni sebesar 75,4%. Grafik hasil koefisien torsi dan koefisien *power* tertera pada gambar 2.10. dan 2.11.



Gambar 2.11 Validasi dari metode komputasi fluida: (atas) *torque coefficient*, (bawah) *power coefficient*, keduanya dibandingkan dengan hasil eksperimen turbin angin *Savonius* konvensional (Mohamed et al, 2011)



Halaman ini sengaja dikosongkan



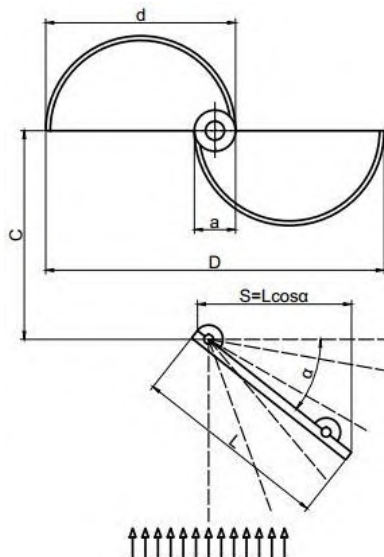
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Parameter yang Diukur

Pada eksperimen aliran fluida melalui turbin angin tipe *Savonius* pada suatu *wind tunnel* dengan penghalang berupa plat datar yang diletakkan di depan *returning blade* diperlukan adanya analisa dimensi untuk mengetahui parameter-parameter yang berpengaruh. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan sudut kemiringan dari plat penghalang dari sudut 0° hingga 90° dengan kenaikan sebesar 5° , sehingga parameter yang mempengaruhi karakteristik aliran antara lain adalah massa jenis fluida udara (ρ), viskositas udara (μ), kecepatan udara (V), sudut penempatan plat datar pengganggu dan diameter turbin (θ), lebar plat datar pengganggu/ perbandingan lebar plat dan diameter turbin (L/d), proyeksi lebar plat datar terhadap sudut pada penghalang (S).

Berikut adalah skema peralatan penelitian beserta parameter yang diukur:



Gambar 3.1 Skema peralatan penelitian (tampak atas)



- ρ : massa jenis fluida udara (kg/m^3)
- μ : viskositas udara (Ns/m^2)
- v : kecepatan fluida (m/s)
- θ : sudut penempatan plat datar pengganggu ($^\circ$)
- L : lebar plat datar pengganggu (m)
- d : diameter sudu turbin (m)
- D : panjang karakteristik (m)
- S : proyeksi lebar plat datar terhadap sudut penghalang (m)

3.2. Analisa Dimensi

Pada penelitian ini diperlukan perhitungan analisa dimensi untuk mengetahui parameter pengujian yang berpengaruh pada karakteristik aliran fluida yang disebabkan oleh adanya plat datar pengganggu.

3.2.1. Analisa Dimensi untuk *Coefficient of Power*

Langkah-langkah analisa dimensi adalah sebagai berikut:

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *Power*

$$P = f(\rho, \mu, v, d, D, L, S, C, H, t)$$

Jumlah parameter (n) : 7 parameter

Parameter-parameter tersebut antara lain:

- P : *power* (J/s)
- ρ : densitas udara (kg/m^3)
- μ : viskositas absolut udara (Ns/m^2)
- v : kecepatan aliran udara (m/s)
- d : diameter sudu turbin (m)
- D : diameter turbin angin (m)
- L : lebar plat datar pengganggu (m)
- S : proyeksi lebar plat datar pengganggu terhadap sudut penghalang (m) $S = L \cos \theta$
- C : jarak antara pusat sudu turbin dengan plat pengganggu (m)
- H : tinggi turbin angin (m)
- t : tinggi plat datar pengganggu (m)



Dimana, parameter $\rho, \mu, d, D, L, S, C, H, t$ bernilai konstan.

2. Menentukan satu grup dimensi primer yang digunakan dalam proses analisa, yaitu M, L, t.
3. Membuat dimensi primer dari parameter-parameter yang dipilih:

Tabel 3.1 Parameter beserta dimensi primernya

NO	PARAMETER	DIMENSI
1	Power, P	$\frac{ML^2}{t^3}$
2	Densitas, ρ	$\frac{M}{L^3}$
3	Viskositas, μ	$\frac{M}{Lt}$
4	Kecepatan, V	$\frac{L}{t}$
5	Diameter, D	L
6	Lebar, L	L
7	Proyeksi Lebar, S	L

4. Memilih parameter berulang yang jumlahnya sama dengan jumlah dimensi primer yang digunakan, yaitu: ρ, V, D .

Jumlah parameter berulang (m) : 3

5. Menentukan grup tak berdimensi yang akan dihasilkan.

Jumlah grup tak berdimensi yang akan dihasilkan :
 $n - m = 7 - 4 = 3$ grup



$$- \pi_1 = \rho^a V^b D^c P = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c \left(\frac{ML^2}{t^3}\right) = (M^0 L^0 t^0)$$

dimana:

$$\begin{aligned} M &: a + 1 = 0 \\ L &: -3a + b + c + 2 = 0 \\ t &: -b - 3 = 0 \end{aligned}$$

diperoleh:

$$a = -1 ; b = -3 ; c = -2$$

$$\text{sehingga, } \pi_1 = \frac{P}{\rho V^3 D^2}$$

- Dengan cara yang sama, diperoleh:

$$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho V D}$$

$$\pi_3 = \frac{\theta}{D}$$

$$\pi_4 = \frac{L}{D}$$

6. Evaluasi grup tak berdimensi yang dihasilkan dengan menggunakan dimensi primer lainnya.

$$\pi_1 = \frac{P}{\rho V^3 D^2} = \frac{FL}{t} \frac{L^4}{F t^2} \frac{t^3}{L^3} \frac{1}{L^2} = 1$$

$$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho V D} = \frac{F t}{L^2} \frac{L^4}{F t^2} \frac{t}{L} \frac{1}{L} = 1$$

$$\pi_3 = \frac{S}{D} = L \frac{1}{L} = 1$$

$$\pi_4 = \frac{L}{D} = L \frac{1}{L} = 1$$

Dari analisa dimensi diatas diperoleh grup tak berdimensi adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \pi_1 &: \text{coefficient of power} \\ \pi_2 &: \text{bilangan Reynolds (Reynolds number)} \\ \pi_3 &: \text{rasio perubahan sudut penempatan plat} \\ &\quad \text{pengganggu dengan diameter turbin} \\ &\quad \text{angin} \\ \pi_4 &: \text{rasio proyeksi lebar plat datar} \\ &\quad \text{pengganggu dengan diameter turbin} \\ &\quad \text{angin} \end{aligned}$$



Hubungan antara grup tak berdimensi adalah sebagai berikut:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4)$$
$$\frac{P}{\rho V^3 D^2} = f\left(\frac{\mu}{\rho V D}, \frac{S}{D}, \frac{L}{D}\right)$$

Pada penelitian ini, L/d sebagai variabel tetap, sedangkan $\mu/\rho V D$ dan S/d divariasikan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap perubahan *coefficient of power* pada turbin angin, sehingga:

$$\frac{P}{\rho V^3 D^2} = f_2\left(\frac{\mu}{\rho V D}, \frac{S}{d}\right)$$

$$C_{op} = f_3\left(\frac{\mu}{\rho V D}, \frac{S}{d}\right)$$

Dalam hal ini, d sebanding dengan D dimana $(D = 2d - a)$, sehingga:

$$C_{op} = f_4\left(\frac{\mu}{\rho V T}, \frac{S}{D}\right)$$

$$C_{op} = f_5\left(Re, \frac{S}{D}\right)$$

dimana, $S = L \cos \theta$; maka,

$$C_{op} = f_6(Re, \theta)$$

3.3. Metode Eksperimen

Pada eksperimen kali ini, digunakan beberapa peralatan yang menunjang pengambilan data eksperimen, diantaranya adalah:

3.3.1. Wind Tunnel (Terowongan Angin)

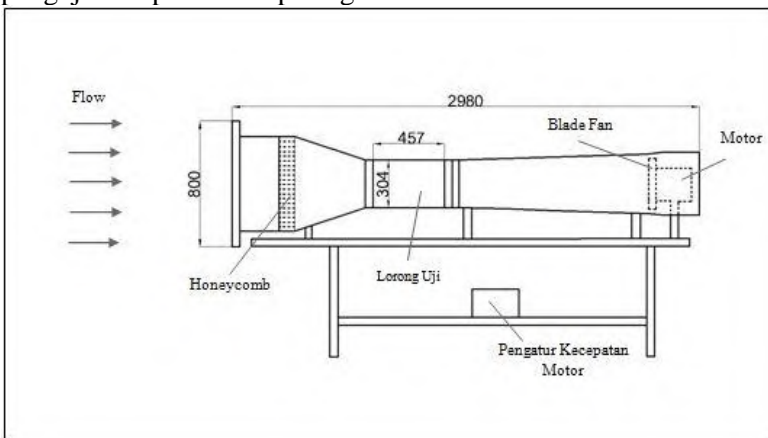
Pada eksperimen ini menggunakan *wind tunnel* untuk proses pengujian benda kerja dalam skala model. Hal ini disebabkan karena pengujian dengan ukuran yang sebenarnya membutuhkan biaya yang cukup besar. Namun, eksperimen ini dilakukan dengan kondisi-kondisi yang mendekati keadaan aslinya, sehingga hasil yang didapatkan cukup akurat dan sesuai dengan kondisi *real*.



Spesifikasi Wind Tunnel

Jenis wind tunnel	: subsonic, open circuit wind tunnel
Bentuk saluran uji	: penampang segi-delapan
Panjang	: 457 mm
Tinggi	: 304 mm
Lebar	: 304 mm
Kecepatan maksimal	: 20 m/s

Konstruksi dari *wind tunnel* yang digunakan dalam pengujian dapat dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 *Wind Tunnel* yang digunakan dalam eksperimen

3.3.2. Benda Uji

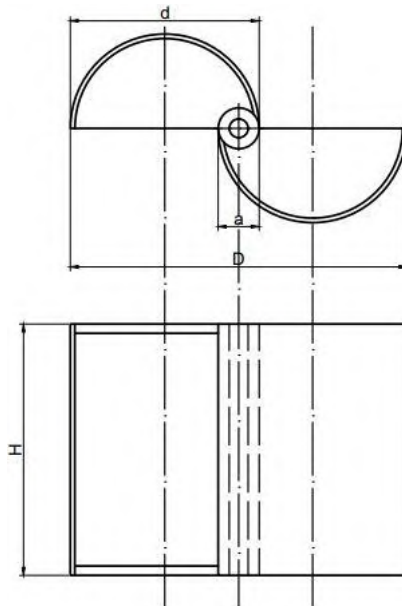
Pada eksperimen ini, benda yang akan diujikan adalah turbin angin tipe *Savonius* dengan plat datar sebagai pengganggu.

Profil turbin angin tipe *Savonius*

Diameter sudu (d)	: 60 mm
Tinggi (H)	: 80 mm
Overlap (a)	: 14 mm
Diameter turbin	: 106 mm



Konstruksi dasar turbin angin *Savonius* dapat dilihat pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Konstruksi dasar turbin angin tipe *Savonius*

Profil plat datar pengganggu

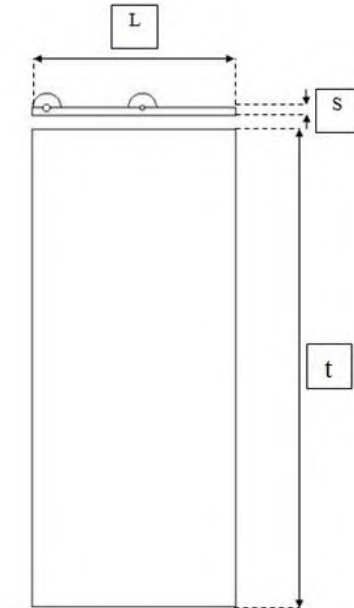
Lebar (L) : 78,324 mm

Tinggi (t) : 150 mm

Tebal (C) : 3 mm

Sudut kemiringan : 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°,
45°, 50°, 55°, 60°, 65°, 70°, 75°, 80°,
85°, 90°

Konstruksi plat datar pengganggu dapat dilihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Konstruksi plat datar pengganggu

3.3.3. Alat Ukur

Pada eksperimen ini tentunya dibutuhkan beberapa peralatan ukur yang nantinya digunakan untuk proses pembacaan data beberapa parameter yang dicari, diantaranya adalah putaran turbin dalam satuan rpm dan torsi dalam satuan N.m yang dihasilkan oleh turbin angin tipe *Savonius*.

3.3.3.1. Tachometer

Tachometer adalah suatu alat ukur digital yang digunakan untuk mengukur kecepatan rotasi dari suatu objek yang berputar. Spesifikasi tachometer yang digunakan dalam eksperimen ini adalah sebagai berikut:

Tipe	: Tachometer OMEGA seri HHT12
Range	: 5 – 99,99 rpm
Akurasi	: $\pm 0,01\%$



Gambar 3.5 Tachometer OMEGA seri HHT12

3.3.3.2. Torquemeter

Torquemeter adalah suatu alat ukur yang digunakan untuk mengukur torsi dari suatu objek. Spesifikasi torquemeter yang digunakan dalam eksperimen ini adalah sebagai berikut:

Tipe : Torquemeter LUTRON seri TQ-8800

Resolusi : $\pm 0,1$ N.cm



Gambar 3.6 Torquemeter LUTRON seri TQ-8800



3.3.3.3. Pitot Static Tube

Pitot static tube adalah alat ukur tekanan yang digunakan untuk mengukur kecepatan aliran. Alat ini berfungsi untuk mengukur nilai tekanan statis dan tekanan stagnasi aliran dan akan dihubungkan dengan manometer.



Gambar 3.7 *Pitot Static Tube*

3.3.3.4. Manometer

Manometer berfungsi untuk membaca perbedaan ketinggian (Δh) sebagai akibat dari perbedaan tekanan kontur dengan tekanan atmosfer. Manometer yang digunakan dalam pengukuran ini adalah manometer berisikan *red oil* ($SG=0,827$) dengan kemiringan sebesar 15° .

3.3.3.5. Generator Listrik

Generator listrik berfungsi sebagai pengubah dari putaran turbin (energi gerak) menjadi energi listrik yang dapat terukur besarnya dengan menggunakan multimeter.

3.3.3.6. Multimeter

Multimeter adalah suatu alat ukur yang digunakan untuk mengukur tegangan, hambatan, dan arus listrik. Spesifikasi multimeter yang digunakan dalam eksperimen ini adalah sebagai berikut:

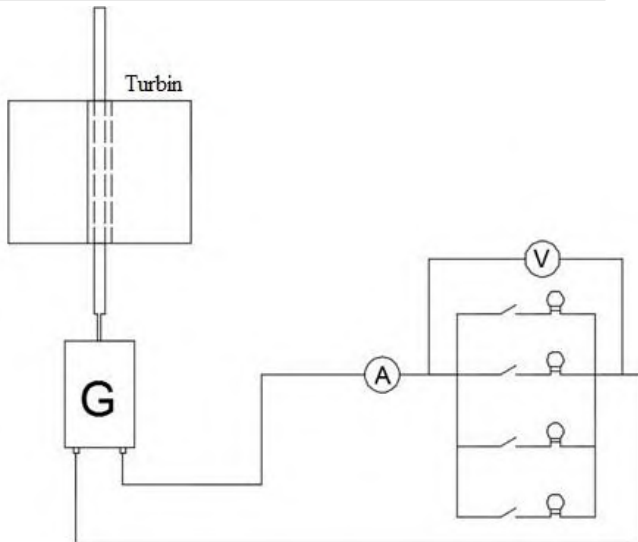
Tipe : Multimeter Sanwa Digital tipe CD-771
Ketelitian : $\pm 0,1\%$



Gambar 3.8 Multimeter Sanwa Digital tipe CD-771

3.4. Metode Pengukuran Daya

Power yang dihasilkan oleh turbin angin dapat diukur dengan menggunakan generator listrik dengan cara menghubungkan poros turbin dengan poros generator dengan menggunakan *flexible coupling*. Generator nantinya akan menghasilkan daya *output* yang digunakan untuk menyalakan pembebanan berupa lampu. Jumlah lampu dapat diatur dengan menggunakan sakelar untuk mendapatkan nilai daya terbesar. Pada rangkaian beban akan diukur tegangan dan arus listrik yang dihasilkan turbin angin. Gambar di bawah ini merupakan mekanisme pengukuran daya output yang digunakan selama pengujian.



Gambar 3.9 Mekanisme pengukuran daya output

3.5. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan dalam proses pengambilan data dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perencanaan, pembelian dan pembuatan peralatan yang akan digunakan
2. Pemasangan benda uji pada *test setion*
3. Fan dinyalakan dan diatur besar frekuensinya dengan menggunakan *inverter* sehingga didapatkan nilai kecepatan dalam *test section* sesuai yang diinginkan
4. Pengukuran putaran poros turbin angin dilakukan dengan menggunakan tachometer.
5. Pengukuran torsi statis dilakukan dengan menggunakan torquemeter
6. Poros turbin angin *Savonius* disambungkan pada generator listrik

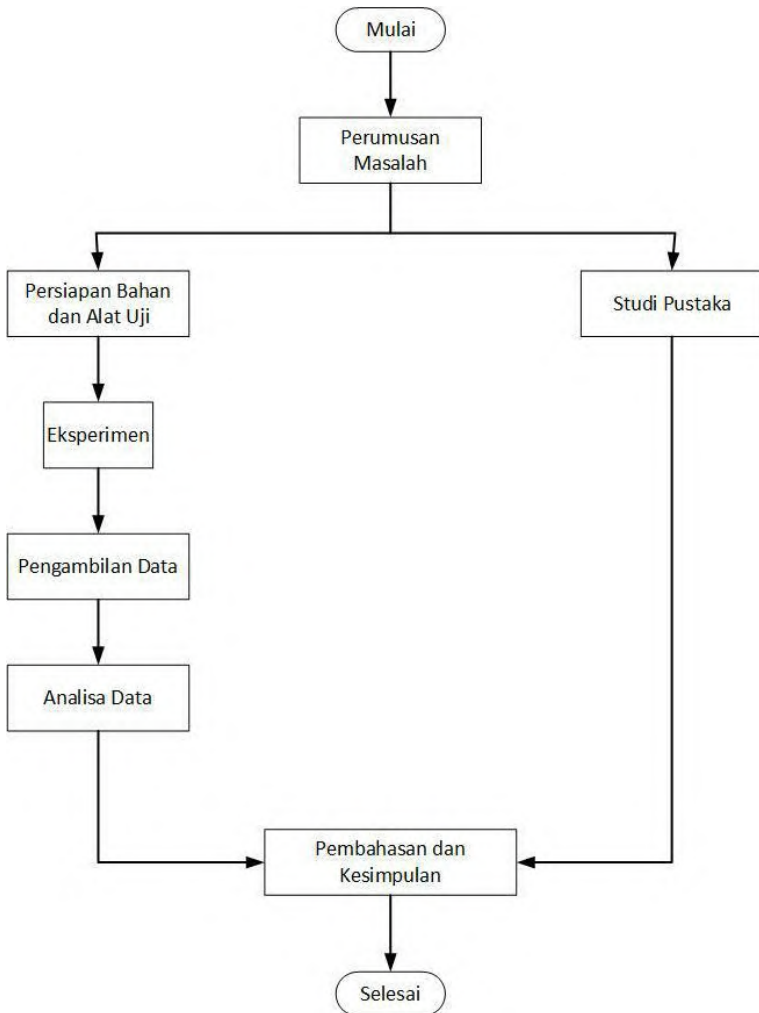


7. Pengukuran tegangan dan hambatan listrik pada generator dengan menggunakan multimeter
8. Fan dimatikan
9. Langkah 3 hingga 9 diulang dengan mengubah bilangan Reynolds menjadi $7,5 \times 10^4$ dan $9,0 \times 10^4$
10. Plat datar pengganggu dipasang tepat di depan *returning blade* dengan sudut 0° terhadap arah aliran fluida
11. Langkah 3 hingga 10 diulang dengan mengubah sudut plat datar pengganggu hingga mencapai 90° dengan kenaikan sebesar 5°
12. Fan dimatikan
13. Semua data yang diperoleh (putaran, torsi statis, tegangan dan arus) diolah
14. Grafik pengaruh besar sudut plat datar pengganggu terhadap *coefficient of power* dibuat dari pengolahan data yang telah diperoleh



3.6. Flowchart Penelitian

Flowchart dari penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut,



Gambar 3.10 Flowchart penelitian



BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, dilakukan beberapa pengukuran untuk mendapatkan beberapa data demi mendapatkan pengaruh pemberian plat datar pengganggu di depan sudu *returning* pada turbin angin Savonius terhadap kinerja dari turbin. Data yang diperoleh diantaranya adalah putaran turbin (N), torsi statis turbin (T), serta daya keluaran turbin (P). Pengukuran dilakukan dengan penambahan variasi berupa variasi nilai bilangan Reynolds aliran (Re) yang melalui turbin angin Savonius serta sudut bukaan (θ) plat datar pengganggu terhadap bidang tegak lurus aliran.

4.1. Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan udara sebagai fluida kerja dengan asumsi sebagai berikut:

1. Tekanan absolut udara dalam kondisi standar,
$$P_{std} = 1,01325 \frac{N}{m^2}$$
2. Temperatur udara dalam kondisi standar, $T_{std} = 288,2K$
3. Massa jenis udara dalam kondisi standar, $\rho_{std} = 1,225 \frac{kg}{m^3}$
4. Panjang karakteristik turbin angin Savonius, $D = 106mm$

Data standar diatas akan digunakan selama perhitungan setelah pengukuran usai dilakukan, dengan langkah-langkah sebagai berikut:

4.1.1. Perhitungan Massa Jenis Udara

Dari persamaan Boyle – Gay Lussac mengenai pemuaian gas, didapatkan bahwa:

$$\frac{P_1 \times V_1}{T_1} = \frac{P_2 \times V_2}{T_2} \quad (4.1)$$

karena, $V = \frac{m}{\rho}$, maka persamaan (4.1) menjadi:



$$\frac{P_1 \times m_1}{T_1 \times \rho_1} = \frac{P_2 \times m_2}{T_2 \times \rho_2} \quad (4.2)$$

dimana:

m_1 : massa udara pada keadaan standar (acuan)

m_2 : massa udara pada saat pengujian

P_1 : tekanan absolut udara pada keadaan standar

P_2 : tekanan absolut udara pada saat pengujian

T_1 : temperatur udara standar

T_2 : temperatur ruangan kerja = $26,5^\circ\text{C} = 299,5^\circ\text{K}$

ρ_1 : massa jenis udara pada keadaan standar

ρ_2 : massa jenis udara pada saat pengujian

Bila keadaan standar dan kondisi pengujian berada pada ketinggian yang sama, maka:

$$P_1 = P_2 \quad (4.3)$$

Dan karena massa udara pada keadaan standar dan pada kondisi pengujian sama, maka:

$$m_1 = m_2 \quad (4.4)$$

Dari batasan tersebut, maka persamaan menjadi:

$$\rho_2 = \frac{T_1 \times \rho_1}{T_2} \quad (4.5)$$

$$\rho_2 = \frac{288.2\text{K} \times 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{299.5\text{K}} = 1,178781 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Sehingga didapatkan massa jenis udara pada kondisi pengujian adalah sebesar 1.178781 kg/m^3 .

4.1.2. Perhitungan Viskositas Absolut Udara

Untuk perhitungan viskositas absolut udara digunakan persamaan Sutherland, yaitu:

$$\mu_2 = \frac{b \times (T_2)^{0.5}}{1 + \frac{S}{T_2}} \quad (4.6)$$

dimana:

$$b = 1,458 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{msK}^{0.5}}$$

$$S = 110,4\text{K}$$



sehingga:

$$\mu_2 = \frac{1,458 \times 10^{-6} \frac{kg}{msK^{0.5}} \times (299,5K)^{0.5}}{1 + \frac{110,4K}{299,5K}} = 1,8436 \times 10^{-5} \frac{kg}{ms}$$

Sehingga didapatkan viskositas absolut udara sebesar $1,8436 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$.

4.1.3. Perhitungan Kecepatan *Freestream*

Berikut merupakan persamaan untuk mendapatkan kecepatan *freestream*:

$$U_\infty = \frac{Re \times \mu}{\rho_2 \times D} \quad (4.7)$$

$$U_\infty = \frac{60.000 \times 1,8507 \times 10^{-5} \frac{kg}{ms}}{1,178781 \frac{kg}{m^3} \times 0,106m} = 8,85m/s$$

Sehingga didapatkan kecepatan *freestream* pada bilangan Reynolds 60.000 adalah sebesar 8,85 m/s.

4.1.4. Perhitungan Kenaikan Tinggi Manometer

Pada penelitian ini digunakan *static pitot tube* dan manometer untuk pengukuran tekanan dinamis aliran udara yang akan digunakan untuk pengukuran kecepatan *freestream* aliran udara. Manometer yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Fluida kerja : *red oil*

Specific gravity : 0,827

Kemiringan : 15°

Demi mendapatkan aliran *freestream* udara dengan kecepatan yang diinginkan, maka digunakan manometer untuk pengukuran dan hukum Bernoulli dalam perhitungan:

$$\frac{P_{statis}}{\rho} + \frac{v_{statis}^2}{2} + gZ_{statis} = \frac{P_{stagnasi}}{\rho} + \frac{v_{stagnasi}^2}{2} + gZ_{stag} \quad (4.8)$$

Karena ketinggian pada titik statis dan stagnasi sama, serta kecepatan pada titik stagnasi sama dengan nol, maka persamaan 4.8. diatas menjadi:



$$\frac{P_{statis}}{\rho} + \frac{v_{statis}^2}{2} = \frac{P_{stagnasi}}{\rho} \quad (4.9)$$

$$v_{statis} = \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_{stagnasi} - P_{statis})} \quad (4.10)$$

$$U_{\infty} = \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_{stagnasi} - P_{statis})} \quad (4.11)$$

Nilai $(P_{stagnasi} - P_{statis})$ ditunjukkan dengan kenaikan ketinggian pada manometer, maka persamaan menjadi:

$$U_{\infty} = \sqrt{\frac{2}{\rho}(\rho_{red\ oil} \times g \times h)} \quad (4.12)$$

$$U_{\infty} = \sqrt{\frac{2}{\rho}(SG_{red\ oil} \times \rho_{water} \times g \times h)} \quad (4.13)$$

$$h = \frac{U_{\infty} \times \rho_{air}}{2 \times SG_{red\ oil} \times \rho_{water} \times g} \quad (4.14)$$

$$h = \frac{8,85 \frac{m}{s} \times 1,185 \frac{kg}{m^3}}{2 \times 0,827 \times 997 \frac{kg}{m^3} \times 9,81 \frac{m^2}{s^2}}$$

$$h = 6,48 \times 10^{-3} m$$

Manometer yang digunakan memiliki kemiringan 15° , sehingga ketinggian yang terbaca dalam manometer adalah:

$$x = \frac{h}{2 \times \sin 15^\circ} \quad (4.15)$$

$$x = \frac{6,48 mm}{2 \times \sin 15^\circ}$$

$$x = 12,52 mm$$

Sehingga, untuk mendapatkan kecepatan aliran *freestream* dengan bilangan Reynolds 60.000, maka ketinggian manometer yang terbaca haruslah pada 12,52 mm.

4.2. Contoh Perhitungan

4.2.1. Perhitungan Daya Turbin

Untuk perhitungan daya turbin yang digunakan adalah dengan cara melakukan pengukuran tegangan dan arus. Sehingga daya yang dihasilkan adalah:



$$P = V \times i \quad (4.16)$$

dimana:

P : daya (Watt)
 V : voltase (Volt)
 i : arus (Ampere)

4.2.2. Perhitungan *Coefficient of Power* Turbin

Sebagai contoh perhitungan, maka digunakan data yang diperoleh pada bilangan Reynolds 60.000 tanpa penambahan plat datar pengganggu. Data pengukuran yang didapatkan adalah sebagai berikut:

Diameter sudu turbin (d) : 60 mm
Tinggi turbin (H) : 80 mm
Diameter overlap (a) : 14 mm
Panjang karakteristik (D) : 106 mm
Kecepatan *freestream* (U_{∞}) : 8,887 m/s
Tegangan listrik (V) : 1,45 Volt
Arus listrik (i) : 26,66 mA
Putaran (N) : 554 rpm

Dari data diatas, maka didapatkan daya input yang mengenai turbin adalah sebagai berikut:

$$P_{in} = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \quad (4.17)$$

$$P_{in} = \frac{1}{2} (\rho \times A \times U_{\infty}) \times U_{\infty}^2 \quad (4.18)$$

$$P_{in} = \frac{1}{2} (\rho \times A) \times U_{\infty}^3 \quad (4.19)$$

dimana nilai A merupakan luas permukaan turbin yang dirumuskan dengan:

$$A = D \times H = (2d - a) \times H \quad (4.20)$$

$$A = (2 \cdot 60 - 14) \times 8 = 8480 \text{ mm}^2$$

Pada penelitian yang telah dilakukan, turbin angin Savonius disambungkan dengan generator listrik dan diberikan pembebanan sehingga dapat dilakukan pengukuran tegangan dan arus dengan menggunakan multimeter dengan data yang telah disebutkan diatas. Maka daya output yang dihasilkan oleh generator listrik adalah sebagai berikut:



$$P = V \times i = 1,45V \times 26,66mA = 38,657mW$$

Coefficient of power adalah nilai yang menunjukkan efisiensi suatu turbin dengan cara menghitung perbandingan daya output yang dihasilkan oleh generator dengan daya input berdasar perhitungan. Sehingga, nilai *coefficient of power* dapat dihitung sebagai berikut:

$$CoP = \frac{P_{output}}{P_{input}} \quad (4.21)$$

$$CoP = \frac{V \times i}{\frac{1}{2} \rho v^3 A} \quad (4.22)$$

$$CoP = \frac{1,45V \times 26,66mA}{\frac{1}{2} \times 1,185 \frac{kg}{m^3} \times \left(8,85 \frac{m}{s}\right)^3 \times 8,48 \cdot 10^{-3} m^2}$$

$$CoP = 0,011 = 1,1\%$$

Sehingga, didapatkan nilai *coefficient of power* dari turbin angin Savonius adalah sebesar 1,1%.

4.2.3. Perhitungan Tip Speed Ratio

Tip speed ratio merupakan perbandingan kecepatan diujung turbin terhadap kecepatan aliran udara yang menggerakkan turbin. Pada perhitungan *tip speed ratio* ini digunakan nilai putaran turbin Savonius setelah disambungkan dengan pembebanan dan generator listrik. Perumusan *tip speed ratio* adalah sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{\omega R}{U_{\infty}} \quad (4.23)$$

$$\lambda = \frac{2\pi \times n \times R}{60 \times U_{\infty}} \quad (4.24)$$

$$\lambda = \frac{2\pi \times 554 rpm \times 0,053m}{60 \times 8,85 \frac{m}{s}}$$

$$\lambda = 0,35$$

4.3. Analisa Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Penghalang

Pada sub-bab ini akan dilakukan analisa performa turbin angin Savonius tanpa adanya penambahan plat penghalang yang nantinya akan digunakan sebagai data acuan. Analisa yang dilakukan meliputi pengaruh variasi bilangan Reynolds terhadap



nilai putaran, torsi statis dan *coefficient of power* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius.

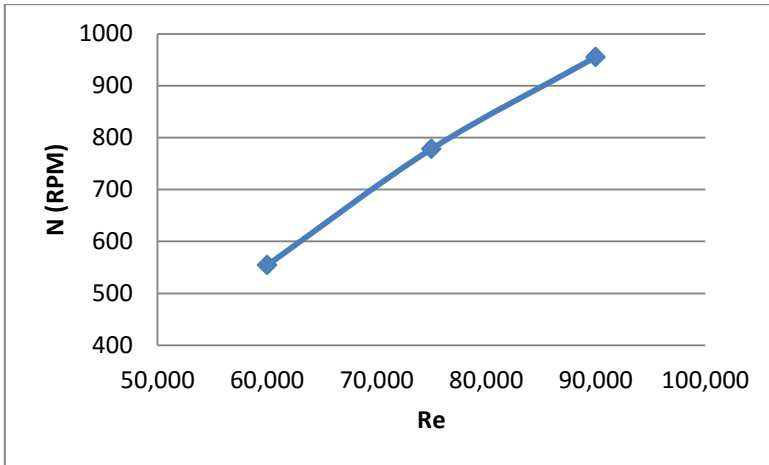
Data penelitian yang didapatkan dari pengukuran yang menunjukkan performa turbin angin Savonius tanpa penghalang dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4.1. Data Standar Turbin Angin Savonius Tanpa Penghalang

Reynolds Number	Putaran, N_0 (rpm) (n_0)	Torsi Statis, T_0 (Ncm)	Daya Output, P_0 (mW)	<i>Coefficients of Power</i> CoP_0 (%)
60,000	554	0.3	0.017248	0.4979
75,000	778	0.4	0.03366	0.4964
90,000	955	0.5	0.055998	0.4784

Dengan data perhitungan dan pengukuran seperti yang dijelaskan pada tabel 4.1. maka didapatkan grafik hubungan antara Reynolds *Number* dan putaran seperti yang terlihat pada gambar 4.1. dibawah ini. Pengukuran nilai putaran ini dilakukan pada variasi bilangan Reynolds sebesar 60.000, 75.000 dan 90.000 dengan menggunakan tachometer digital tanpa adanya penambahan beban berupa generator listrik.

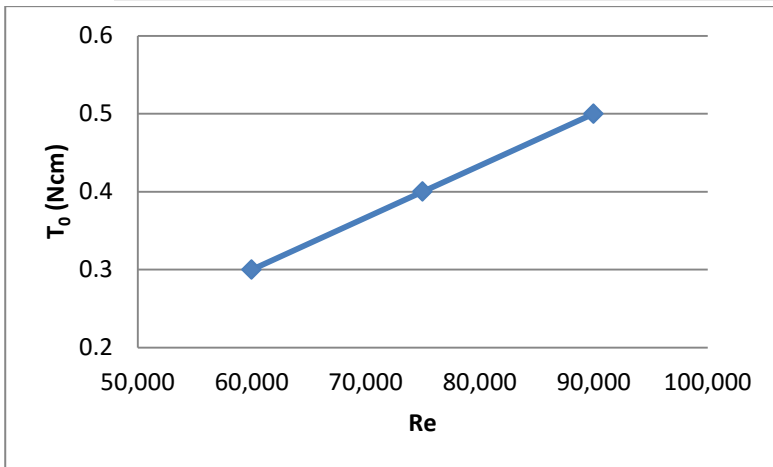
Gambar 4.1. menunjukkan grafik putaran turbin tanpa penghalang (N) dengan fungsi bilangan Reynolds (Re), dimana nilai tertinggi adalah pada bilangan Reynolds sebesar 90.000 dengan nilai putaran 955 rpm dan nilai terendah pada bilangan Reynolds sebesar 60.000 dengan nilai putaran sebesar 554 rpm.



Gambar 4.1 Grafik putaran turbin tanpa penghalang fungsi bilangan Reynolds

Hal ini terjadi disebabkan karena pada saat bilangan Reynolds tinggi, maka kecepatan aliran meningkat, sehingga putaran dari turbin pun menjadi meningkat. Sebaliknya, pada saat bilangan Reynolds rendah, maka kecepatan aliran udara yang dialirkan pun berkurang sehingga putaran turbin menjadi turun.

Gambar 4.2 adalah grafik pengukuran torsi statis pada variasi bilangan Reynolds yakni pada 60.000, 75.000 dan 90.000 dengan menggunakan torsimeter digital. Analisa ini dilakukan dengan mengukur nilai torsi statis pada turbin angin Savonius dengan sudut *blade* 0° terhadap bidang tegak lurus aliran dengan cara menahan *torquemeter* sehingga sudu turbin dalam kondisi diam/ statis.



Gambar 4.2 Grafik torsi statis turbin tanpa penghalang fungsi bilangan Reynolds

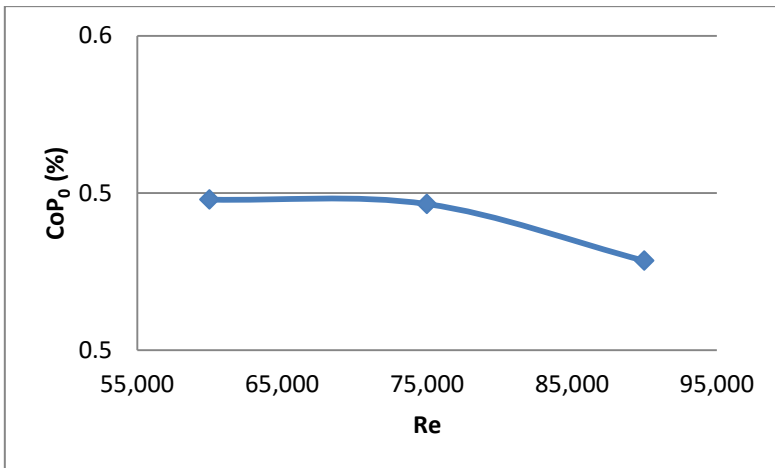
Gambar 4.2. menunjukkan grafik torsi statis turbin (T_0) tanpa penghalang fungsi bilangan Reynolds (Re). Dimana terlihat bahwa seiring dengan peningkatan bilangan Reynolds maka semakin meningkat pula nilai torsi statisnya. Nilai torsi statis tertinggi adalah pada bilangan Reynolds 90.000 dengan nilai torsi statis sebesar 0.5 Ncm, sedangkan pada bilangan Reynolds 75.000, didapatkan nilai torsi statis sebesar 0.4 Ncm dan nilai terendah pada bilangan Reynolds 60.000 dengan nilai torsi statis sebesar 0.3 Ncm.

Peningkatan nilai torsi statis seiring dengan peningkatan bilangan Reynolds ini terjadi dikarenakan dengan semakin meningkatnya bilangan Reynolds maka kecepatan aliran udara yang dihisap juga semakin besar sehingga gaya yang ditimbulkan oleh aliran udara tersebut juga semakin besar dan menjadikan peningkatan pada nilai torsi statis. Selain itu perumusan torsi statis merupakan perkalian antara gaya dengan jari-jari sudu turbin, sehingga yang berpengaruh bila terjadi peningkatan adalah gaya yang mengenai turbin. Saat bilangan Reynolds meningkat maka akan semakin tinggi kecepatan aliran



udara yang dialirkan, oleh karenanya gaya yang menghantam sudu turbin akan semakin besar pula.

Gambar 4.3. menunjukkan grafik koefisien daya turbin tanpa penghalang (CoP_0) dengan fungsi bilangan Reynolds (Re). Pengukuran daya dilakukan dengan menggunakan multimeter yang terpasang pada rangkaian dimana poros turbin tersambung dengan poros generator, dan generator tersambung dengan rangkaian lampu. Pengukuran ini dilakukan dengan variasi bilangan Reynolds pada 60.000, 75.000 dan 90.000. Dimana titik tertinggi adalah pada bilangan Reynolds 60.000 dengan nilai *coefficient of power* sebesar 0,498% dan terendah pada bilangan Reynolds 90.000 dengan nilai *coefficient of power* sebesar 0,478%.



Gambar 4.3 Koefisien daya turbin tanpa penghalang fungsi bilangan Reynolds

Perumusan koefisien daya sendiri dinyatakan dengan perbandingan daya output dengan daya input, dimana daya output dihitung dengan mengalikan tegangan dan arus yang dihasilkan



turbin. Meski timbul peningkatan baik pada voltase dan arus yang dihasilkan oleh turbin, namun peningkatan tersebut tidak mampu mengimbangi kecepatan aliran yang turut meningkat seiring dengan peningkatan bilangan Reynolds. Terlebih lagi daya input bergantung kepada perpangkatan tiga dari kecepatan aliran. Sehingga seiring dengan peningkatan bilangan Reynolds, koefisien daya-nya cenderung menurun sesuai dengan grafik diatas.

4.4. Analisa Putaran Turbin Angin Savonius dengan Penambahan Plat Pengganggu

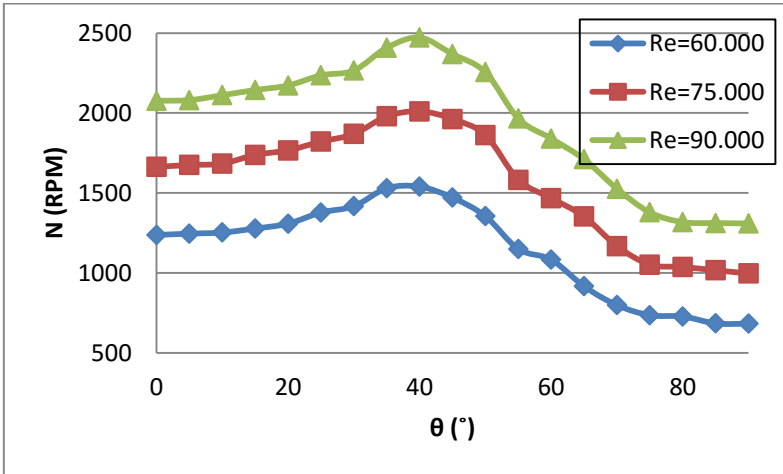
Hipotesa awal dari pengujian ini adalah untuk membuktikan dengan adanya penambahan penghalang yang diletakkan di depan sudu *returning* turbin angin Savonius akan dapat meningkatkan performa dari turbin itu sendiri. Grafik perbandingan sudut bukaan penghalang dengan nilai putaran yang dihasilkan oleh turbin dapat dilihat di bawah ini. Pengukuran putaran ini dilakukan dengan menggunakan tachometer digital dengan variasi sudut bukaan penempatan plat datar dari 0° hingga 90° dengan kenaikan 5° pada variasi bilangan Reynolds yaitu 60.000, 75.000 dan 90.000.

Seperti yang terlihat pada gambar 4.4, pada beberapa bilangan Reynolds yang diujikan memiliki trendline yang serupa dimana nilai putaran tertinggi pada sudut bukaan 40° untuk bilangan Reynolds 90.000 sebesar 2471.5 rpm. Sedangkan nilai putaran terendah adalah pada sudut bukaan 90° untuk bilangan Reynolds 60.000 sebesar 681.47 rpm.

Terlihat pada gambar 4.4. diatas bahwa pada seluruh bilangan Reynolds yang diuji memiliki trendline yang sama yaitu mengalami peningkatan pada sudut bukaan 0° hingga mencapai puncak di 40° dan kemudian menurun hingga mencapai titik terendah pada sudut bukaan 90°. Hal ini disebabkan karena nilai putaran dipengaruhi oleh laju massa aliran udara, semakin besar laju massa aliran udara yang mengarah ke sudu *advancing* turbin maka semakin besar pula nilai putaran yang dihasilkan oleh



turbin. Selain itu perbandingan panjang penghalang dengan diameter sudu turbin adalah sebesar 1,3054 sehingga pada bukaan sudut sebesar 40° plat datar pengganggu akan dapat menutup sudu *returning* secara penuh dan mengarahkan aliran menuju sudu *advancing*.



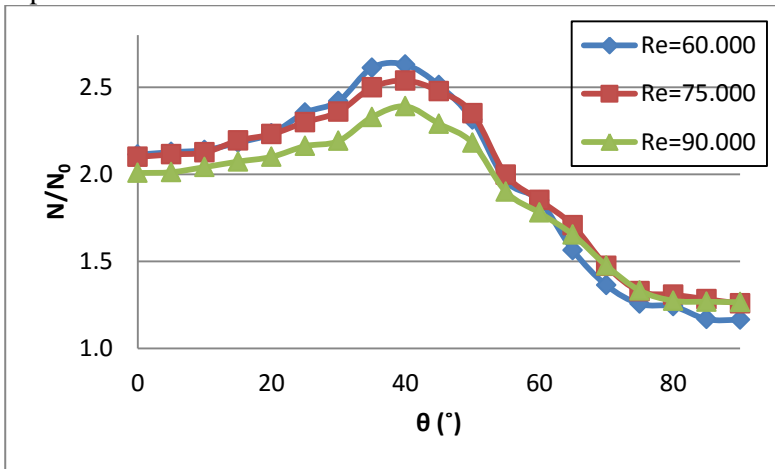
Gambar 4.4 Grafik putaran turbin berpenghalang dengan fungsi sudut bukaan plat (θ)

Tambahan aliran udara yang diarahkan oleh plat penghalang inilah yang menyebabkan peningkatan nilai putaran yang paling maksimal. Namun, setelah sudut bukaan menjadi lebih dari 40° terjadi penurunan nilai putaran, hal ini dikarenakan pada saat sudut bukaan lebih dari 40° sumbu tegak lurus arah aliran, pada sisi sudu *returning* akan terbuka kembali sedikit demi sedikit yang awalnya tertutup sepenuhnya oleh plat datar pengganggu. Maka aliran fluida akan dapat menghantam sudu *returning* dimana seiring dengan kenaikan sudut bukaan tersebut akan semakin banyak aliran fluida yang menghantam sudu *returning*. Sehingga gaya drag pada sudu *returning* akan meningkat dan



selisih torsi pun turun hingga menjadikan nilai putaran ikut menurun setelah mencapai titik puncak pada sudut bukaan 40° .

Saat nilai putaran yang dihasilkan pada turbin dengan penambahan plat datar pengganggu dibandingkan dengan nilai putaran standar (tanpa penghalang) akan menghasilkan grafik seperti dibawah ini.



Gambar 4.5 Grafik perbandingan putaran standar (tanpa penghalang) dengan putaran dengan penambahan penghalang dengan fungsi sudut bukaan (θ)

Seperti yang terlihat pada gambar diatas, trendline dari grafik tersebut menyerupai grafik putaran seperti yang dijelaskan pada gambar 4.4.. Dimana nilai N/N_0 tertinggi adalah pada sudut bukaan 40° sebesar 2.63 pada bilangan Reynolds 60.000 dan nilai N/N_0 terendah pada sudut bukaan 90° sebesar 1.16 yang juga terdapat pada bilangan Reynolds 60.000.

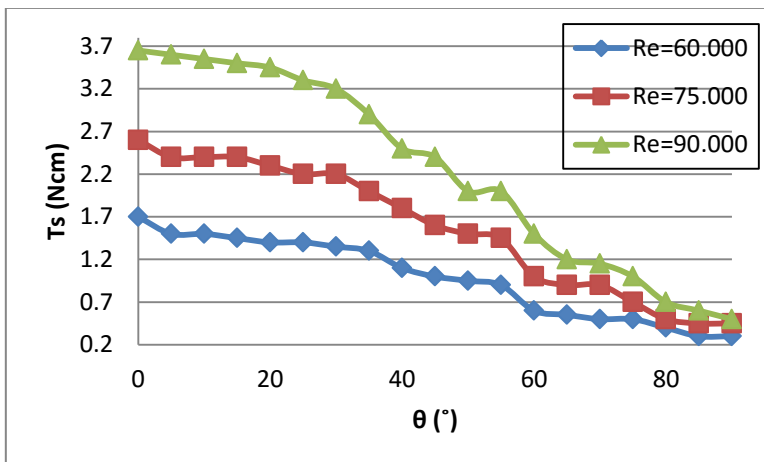
Terlihat pada gambar 4.5., putaran yang dihasilkan turbin berpenghalang masih lebih tinggi jika dibandingkan dengan putaran standar atau tanpa adanya penambahan penghalang. Hal ini ditunjukkan dengan nilai $\frac{N}{N_0} > 1$ untuk semua θ serta semua



bilangan Reynolds. Namun pada sudut bukaan mendekati 90° , nilai $\frac{N}{N_0}$ mendekati 1. Hal ini disebabkan karena konfigurasi pada saat θ mendekati sudut 90° hampir sama dengan konfigurasi pada saat tidak diberikan penghalang. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pemberian penghalang dengan $L/D = 1,3054$ pada bilangan Reynolds 60.000, 75.000 dan 90.000 akan meningkatkan nilai putaran yang dihasilkan oleh turbin.

4.5. Analisa Torsi Statis Turbin Angin Savonius dengan Penambahan Plat Pengganggu

Hipotesa awal dari analisa torsi statis ini adalah dengan penambahan plat datar penghalang di depan *returning blade* turbin angin Savonius, maka nilai torsi statis akan meningkat. Pengukuran torsi statis ini dilakukan dengan menggunakan torsimeter digital pada bilangan Reynolds 60.000, 75.000 dan 90.000. Grafik torsi statis pada variasi sudut bukaan dan bilangan Reynolds tertentu dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



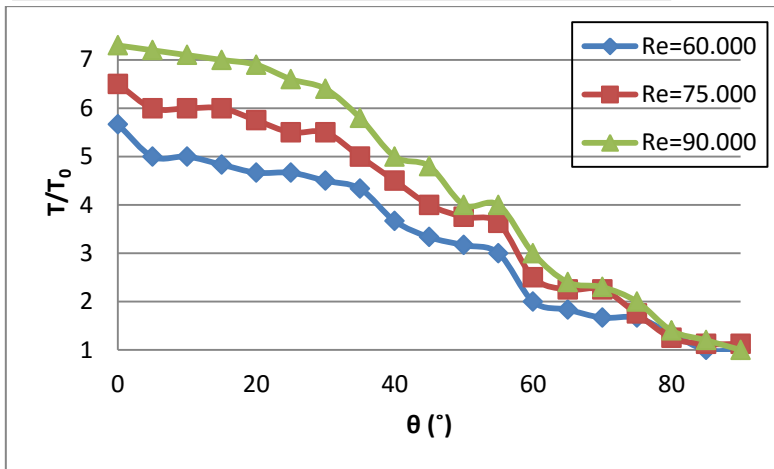
Gambar 4.6 Grafik torsi statis turbin berpenghalang dengan fungsi sudut bukaan plat (θ)



Grafik torsi statis turbin berpenghalang (T) dengan fungsi sudut bukaan (θ) menunjukkan trendline yang cenderung menurun seiring dengan kenaikan sudut bukaan plat penghalang seperti yang terjadi pada gambar 4.5. Nilai torsi statis terbesar adalah pada bilangan Reynolds 90.000 dan sudut bukaan 0° dengan nilai torsi statis sebesar 3,65 Ncm dan nilai torsi statis terendah adalah pada bilangan Reynolds 60.000 dan sudut bukaan 90° dengan nilai torsi statis sebesar 0,3 Ncm.

Seperti yang terlihat pada gambar, pada masing-masing bilangan Reynolds memiliki nilai torsi statis tertinggi pada sudut bukaan 0° dan akan terus menurun hingga mencapai titik terendah pada sudut bukaan 90° . Hal ini terjadi disebabkan karena pada saat plat datar penghalang menghalangi sudu *returning* secara sempurna, maka koefisien *drag* pada sudu *returning* pun akan menjadi semakin kecil. Sehingga selisih koefisien *drag* pada sudu *returning* dan *advancing* semakin besar. Saat selisih koefisien *drag* yang terjadi besar maka nilai torsi statis pun turut meningkat. Namun saat sudut bukaan plat penghalang terus dinaikkan, maka plat penghalang akan sedikit demi sedikit terbuka dan menyebabkan aliran udara dapat kembali menghantam sudu *returning* sehingga koefisien *drag* akan kembali naik dan selisih koefisien *drag* diantara kedua sudu menurun dan torsi statis pun menjadi turun.

Saat nilai torsi statis yang dihasilkan turbin berpenghalang dibandingkan dengan torsi statis turbin tak berpenghalang akan menghasilkan grafik seperti pada gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik perbandingan torsi statis standar (tanpa penghalang) dengan torsi statis dengan penambahan penghalang dengan fungsi sudut bukaan

Gambar 4.7. merupakan grafik perbandingan torsi statis berpenghalang (T) dengan torsi statis tanpa penghalang (T_0), dimana nilai tertinggi adalah pada sudut bukaan 0° dan bilangan Reynolds 90.000. Sedangkan titik terendah adalah pada sudut bukaan 90° pada semua bilangan Reynolds yang menunjukkan angka 1. Seperti yang terlihat pada grafik diatas, trendline pada setiap bilangan Reynolds hampir serupa dimana seiring dengan peningkatan bukaan sudut plat penghalang, nilai T/T_0 semakin menurun.

Terlihat pada gambar 4.7. bahwa nilai $\frac{T}{T_0} \geq 1$. Hal ini menunjukkan bahwa pada bukaan yang paling tidak optimum pun ($\theta=90^\circ$), nilai T/T_0 yang dihasilkan sama dengan nilai torsi statis tanpa penghalang. Hal ini terjadi dikarenakan pada sudut bukaan 90° memiliki konfigurasi yang hampir sama dengan tanpa penghalang, dimana selisih koefisien *drag* antara sudu *returning* dan *advancing* pun sama dan menghasilkan nilai torsi statis yang sama. Sehingga dapat disimpulkan bahwa penambahan



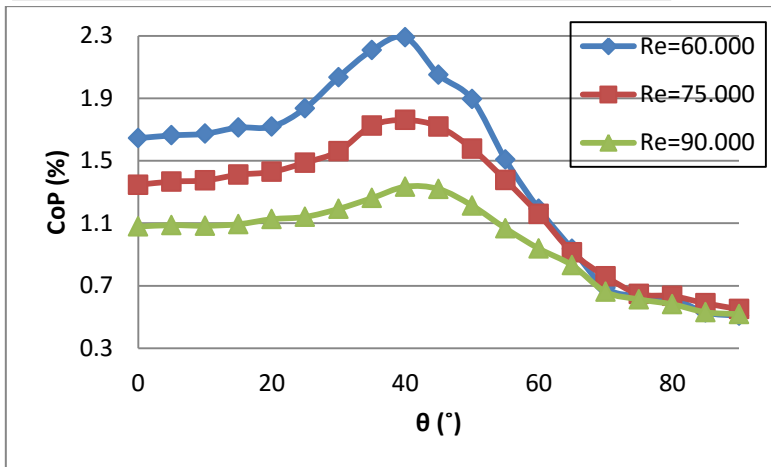
penghalang dengan $L/d = 1,3054$ pada bilangan Reynolds 60.000, 75.000 dan 90.000 dapat meningkatkan nilai torsi statis pada sudut bukaan 0° hingga 80° .

4.6. Analisa Coefficient of Power Turbin Angin Savonius dengan Penambahan Plat Pengganggu

Hipotesa awal dari analisa *coefficient of power* turbin angin Savonius ini adalah bahwa dengan penambahan plat datar pengganggu di depan *returning blade* akan dapat menghasilkan daya output yang lebih baik bila dibandingkan dengan turbin angin tanpa penghalang sehingga nilai CoP pun akan meningkat. Pengukuran daya output ini dilakukan dengan menggunakan multimeter yang terpasang pada rangkaian, dimana poros turbin tersambung dengan poros generator listrik dengan menggunakan *flexible coupling* kemudian generator listrik tersambung dengan rangkaian lampu. Pengukuran ini dilakukan pada variasi bilangan Reynolds sebesar 60.000, 75.000 dan 90.000. Hasil pengukuran daya dapat dilihat pada gambar 4.8.

Gambar 4.8 menunjukkan grafik CoP dengan sudut bukaan plat penghalang pada beberapa bilangan Reynolds. Dimana nilai CoP tertinggi adalah pada bilangan Reynolds 60.000 dan sudut bukaan 40° dengan nilai CoP sebesar 2.29% dan nilai terendah pada bilangan Reynolds 60.000 dan sudut bukaan 90° dengan nilai CoP sebesar 0.50%.

Gambar 4.8 menunjukkan bahwa peningkatan bilangan Reynolds yang berarti peningkatan kuantitas aliran fluida tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan efisiensi daya output berbanding daya input. Karena meski memiliki kuantitas aliran fluida terbesar pada bilangan Reynolds 90.000, nilai CoP-nya justru semakin kecil bila dibandingkan dengan bilangan Reynolds yang lain. Selain itu pada sudut bukaan 40° juga terlihat memiliki nilai CoP tertinggi, hal ini menunjukkan bahwa sudut 40° merupakan titik paling optimum dalam menghasilkan daya pada turbin angin Savonius pada seluruh variasi bilangan Reynolds yang diujikan.



Gambar 4.8 Grafik koefisien daya turbin berpenghalang dengan fungsi sudut bukaan

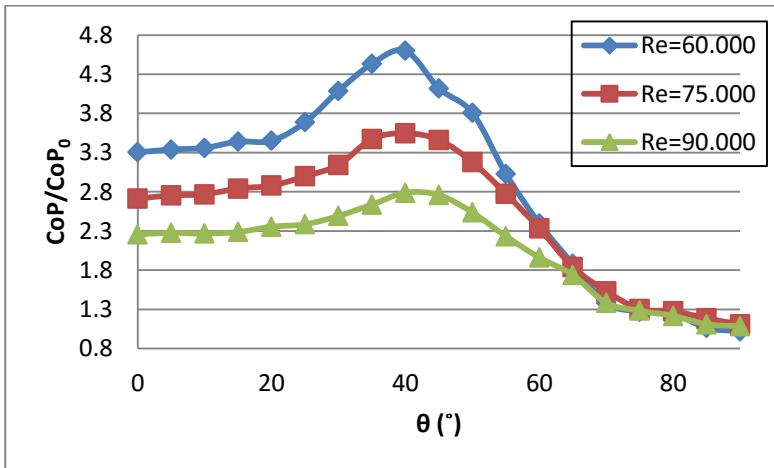
Berikut ini merupakan grafik perbandingan koefisien daya turbin berpenghalang dengan koefisien daya turbin tanpa penghalang (CoP/CoP_0) dengan fungsi sudut bukaan.

Gambar 4.9. menunjukkan grafik perbandingan koefisien daya turbin berpenghalang dengan koefisien daya turbin tanpa penghalang dengan fungsi sudut bukaan plat (θ) pada variasi bilangan Reynolds. Trendline dari ketiga grafik tersebut dapat dinyatakan relatif sama, yaitu meningkat hingga titik puncak pada sudut bukaan 40° dan kemudian menurun hingga mencapai titik terendah yaitu mendekati nilai satu pada sudut bukaan 90° .

Hal ini menunjukkan bahwa sudut bukaan 40° merupakan titik paling optimum pada semua bilangan Reynolds yang diuji dalam menghasilkan daya output yang terbesar jika dibandingkan dengan koefisien daya turbin tanpa penghalang. Sama halnya dengan gambar 4.8 dimana bilangan Reynolds yang relatif diatas adalah 60.000, pada CoP/CoP_0 juga memiliki tampilan grafik yang sama dengan grafik pada bilangan Reynolds 60.000 menempati posisi teratas dan pada bilangan Reynolds 90.000 menempati posisi paling bawah. Perlu diketahui bahwa nilai ini



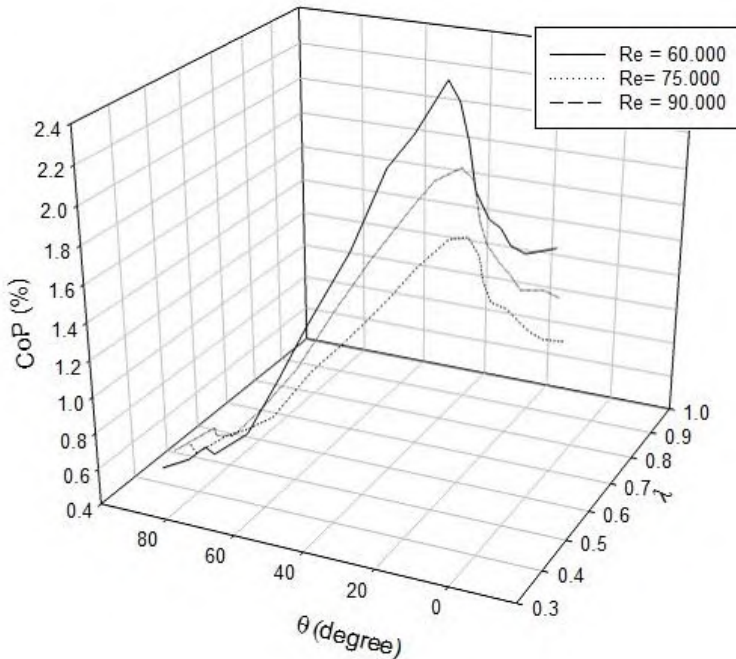
menunjukkan bahwa pada seluruh bilangan Reynolds yang diuji memiliki nilai yang lebih besar dari 1. Sehingga dapat disimpulkan bahwa daya yang dihasilkan oleh turbin berpenghalang lebih optimum dibandingkan dengan turbin tak berpenghalang.



Gambar 4.9 Grafik perbandingan koefisien daya turbin berpenghalang dengan koefisien daya turbin tanpa penghalang dengan fungsi sudut bukaan plat

4.7. Analisa *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius Terhadap Tip Speed Ratio

Tip speed ratio merupakan perbandingan kecepatan di ujung *blade* turbin Savonius terhadap kecepatan aliran udara, dimana kecepatan di ujung *blade* diperoleh dengan mengukur putaran pada saat pembebanan. Hasil dari pengukuran dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.10 Grafik *coefficient of power* dengan fungsi *tip speed ratio* dan sudut bukaan

Gambar 4.10. diatas menunjukkan grafik *coefficient of power* (CoP) pada sudut bukaan 0° hingga 90° dengan fungsi *tip speed ratio* (TSR) pada variasi bilangan Reynolds 60.000, 75.000 dan 90.000. Terlihat pada grafik bahwa nilai tertinggi adalah pada bilangan Reynolds 60.000 dengan nilai *tip speed ratio* sebesar 0,82 dan nilai *coefficient of power* sebesar 2,29%.

Terlihat pula bahwa trendline grafik pada gambar 4.10. relatif sama pada ketiga bilangan Reynolds yang diuji dimana seiring dengan peningkayan *tip speed ratio* nilai *coefficient of power* relatif meningkat. Secara teoritis grafik CoP terhadap TSR berbentuk kurva kubah yaitu nilai CoP akan terus meningkat hingga titik tertentu mencapai puncak dan kemudian turun

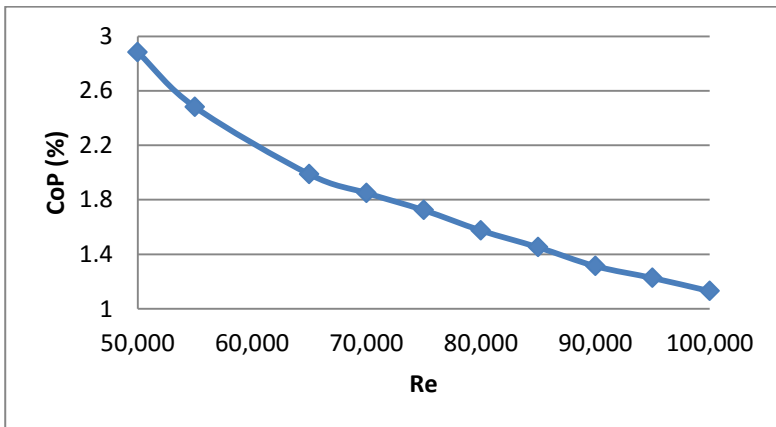


kembali, namun pada penelitian ini diperkirakan nilai *coefficient of power* masih belum mencapai titik puncak sehingga menghasilkan grafik seperti pada gambar 4.10.

4.8. Analisa *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius Pada Berbagai Bilangan Reynolds dengan Penambahan Penghalang

Pengukuran yang paling akhir dilakukan adalah perhitungan *coefficient of power* pada berbagai bilangan Reynolds. Setelah mengetahui sudut bukaan yang paling optimum ($\theta=40^\circ$) maka pengukuran daya dilakukan pada beberapa bilangan Reynolds untuk mengetahui nilai bilangan Reynolds yang menghasilkan daya terbesar atau paling optimum.

Hasil pengukuran dan perhitungan tersebut dapat dilihat pada gambar 4.11.



Gambar 4.11 Grafik *coefficient of power* terhadap bilangan Reynolds

Seperti yang terlihat pada gambar diatas, nilai bilangan Reynolds paling optimum adalah pada 50.000 dimana seiring



dengan peningkatan bilangan Reynolds, nilai *coefficient of power* menjadi semakin menurun.

Hal tersebut diatas menunjukkan bahwa dengan adanya peningkatan kuantitas aliran yang berarti peningkatan daya input tidak selalu seiring dengan peningkatan efisiensi daya-nya. Perumusan dari koefisien daya sendiri adalah perbandingan dari daya output dan daya input. Dimana daya output dihitung dengan cara mengukur tegangan dan arus, dan daya input dihitung dengan mengalikan massa jenis udara, luas permukaan turbin, kecepatan aliran yang dipangkatkan tiga. Saat bilangan Reynolds yang ditingkatkan, terjadi kenaikan pada voltase dan arus yang diukur. Namun sebaliknya, kecepatan aliran pun turut meningkat seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds. Saat kecepatan aliran dipangkatkan tiga, maka meski terjadi kenaikan pada voltase dan arus, namun tidak mampu mengimbangi peningkatan kecepatan aliran. Sehingga seiring dengan peningkatan bilangan Reynolds, nilai koefisien daya menjadi semakin menurun.

Koefisien daya atau *coefficient of power* juga merupakan bilangan tak berdimensi yang menunjukkan efisiensi dan dinyatakan dalam persentase. Grafik efisiensi pada umumnya berbentuk kurva seperti kubah yang mencapai puncak pada suatu titik tertentu. Tujuan utama dilakukan pengukuran pada sub-bab ini adalah untuk mengetahui titik paling optimum dari kurva efisiensi tersebut. Sehingga nantinya akan didapatkan hasil berupa nilai bilangan Reynolds yang paling optimum dalam menghasilkan daya keluaran turbin angin Savonius. Namun dari grafik tersebut diatas dapat diketahui bahwa belum bisa didapatkan kurva seperti kubah yang menunjukkan titik paling optimum dalam menghasilkan daya output. Hal ini dapat dikarenakan bilangan Reynolds yang diukur masih belum mencapai titik paling optimum dan perlu diperbesar lagi *range* dari bilangan Reynolds yang diuji.

Lampiran – 1

Data Hasil Pengukuran Variasi Sudut Buka pada Reynold's Number: 60.000

Sudut θ (°)	Freq.	Putaran (RPM)	Torsi Statik (Ncm)	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Watt)	Putaran Real (RPM)	TSR, λ	CoP	CoP (%)	N/No	T/To	CoP/ CoPo
Std	23.35	585.45	0.30	1.76	0.00980	0.01725	554.00	0.34757	0.004979	0.49786	-	-	-
0	26.60	1237.00	1.70	1.85	0.03080	0.05698	1114.10	0.69897	0.016447	1.64473	2.11290	5.67	3.30359
5	26.00	1245.20	1.50	1.84	0.03130	0.05759	1028.80	0.64546	0.016624	1.66239	2.12691	5.00	3.33907
10	25.85	1252.20	1.50	1.84	0.03150	0.05796	1050.20	0.65888	0.016730	1.67301	2.13887	5.00	3.36041
15	25.65	1277.20	1.45	1.86	0.03190	0.05933	1101.90	0.69132	0.017127	1.71267	2.18157	4.83	3.44007
20	25.60	1307.70	1.40	1.86	0.03200	0.05952	1140.50	0.71554	0.017180	1.71804	2.23367	4.67	3.45086
25	25.55	1377.70	1.40	1.86	0.03420	0.06361	1165.10	0.73097	0.018362	1.83616	2.35323	4.67	3.68810
30	25.35	1416.80	1.35	1.86	0.03790	0.07049	1231.40	0.77257	0.020348	2.03481	2.42002	4.50	4.08711
35	25.30	1529.00	1.30	1.87	0.04090	0.07648	1281.50	0.804	0.022077	2.20768	2.61167	4.33	4.43434
40	24.55	1539.10	1.10	1.88	0.04220	0.07934	1314.40	0.82464	0.022900	2.29003	2.62892	3.67	4.59975
45	24.45	1470.20	1.00	1.86	0.03820	0.07105	1213.90	0.76159	0.020509	2.05091	2.51123	3.33	4.11946
50	24.35	1354.10	0.95	1.86	0.03530	0.06566	1150.80	0.722	0.018952	1.89522	2.31292	3.17	3.80673
55	24.50	1149.10	0.90	1.84	0.02840	0.05226	1034.00	0.64872	0.015084	1.50837	1.96276	3.00	3.02970
60	24.35	1082.60	0.60	1.82	0.02270	0.04131	873.78	0.5482	0.011925	1.19253	1.84918	2.00	2.39531
65	23.90	915.63	0.55	1.80	0.01800	0.03240	807.15	0.5064	0.009352	0.93523	1.56398	1.83	1.87849
70	24.00	797.98	0.50	1.79	0.01330	0.02381	728.35	0.45696	0.006872	0.68719	1.36302	1.67	1.38028
75	23.90	735.13	0.50	1.78	0.01230	0.02189	642.90	0.40335	0.006320	0.63197	1.25567	1.67	1.26937
80	24.20	727.06	0.40	1.77	0.01210	0.02142	677.79	0.42524	0.006182	0.6182	1.24188	1.33	1.24172
85	24.15	683.75	0.30	1.78	0.01030	0.01833	674.42	0.42312	0.005292	0.52921	1.16791	1.00	1.06297
90	24.15	681.47	0.30	1.76	0.01000	0.01760	622.58	0.3906	0.005080	0.50802	1.16401	1.00	1.02041

Lampiran – 2

Data Hasil Pengukuran Variasi Sudut Bukaannya Pada Reynolds

Number: 75.000

Sudut θ (°)	Freq.	Putaran (RPM)	Torsi Statik (Ncm)	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Watt)	Putaran Real (RPM)	TSR, λ	CoP	CoP (%)	N/No	T/To	CoP/ CoPo
Std	29.20	792.17	0.40	1.80	0.01870	0.033660	778.00	0.39022	0.0049645	0.49645	-	-	-
0	33.50	1663.30	2.60	1.89	0.04830	0.091287	1442.40	0.72346	0.0134638	1.34638	2.09968	6.50	2.71201
5	33.00	1674.40	2.40	1.88	0.04930	0.092684	1453.50	0.72903	0.0136698	1.36698	2.11369	6.00	2.75351
10	32.85	1683.60	2.40	1.89	0.04930	0.093177	1411.60	0.70802	0.0137425	1.37425	2.12530	6.00	2.76816
15	32.75	1737.70	2.40	1.89	0.05060	0.095634	1465.00	0.7348	0.0141049	1.41049	2.19359	6.00	2.84116
20	32.40	1766.30	2.30	1.90	0.05100	0.096900	1520.20	0.76249	0.0142916	1.42916	2.22970	5.75	2.87877
25	32.20	1820.90	2.20	1.90	0.05310	0.100890	1559.70	0.7823	0.0148801	1.48801	2.29862	5.50	2.99730
30	31.95	1868.60	2.20	1.90	0.05570	0.105830	1637.80	0.82147	0.0156087	1.56087	2.35884	5.50	3.14406
35	31.70	1978.70	2.00	1.92	0.06090	0.116928	1726.00	0.86571	0.0172455	1.72455	2.49782	5.00	3.47377
40	31.30	2010.20	1.80	1.91	0.06250	0.119375	1761.70	0.88362	0.0176064	1.76064	2.53759	4.50	3.54647
45	31.20	1962.40	1.60	1.91	0.06100	0.116510	1676.30	0.84078	0.0171839	1.71839	2.47725	4.00	3.46135
50	31.50	1861.50	1.50	1.89	0.05660	0.106974	1620.90	0.81299	0.0157774	1.57774	2.34987	3.75	3.17805
55	30.95	1582.10	1.45	1.89	0.04940	0.093366	1439.40	0.72196	0.0137704	1.37704	1.99717	3.63	2.77378
60	30.80	1467.60	1.00	1.87	0.04200	0.078540	1289.30	0.64667	0.0115837	1.15837	1.85263	2.50	2.33332
65	30.75	1352.30	0.90	1.85	0.03350	0.061975	1136.30	0.56993	0.0091406	0.91406	1.70708	2.25	1.84119
70	30.70	1167.40	0.90	1.84	0.02800	0.051520	1002.10	0.50262	0.0075986	0.75986	1.47367	2.25	1.53059
75	30.45	1051.70	0.70	1.83	0.02400	0.043920	923.60	0.46325	0.0064777	0.64777	1.32762	1.75	1.30480
80	30.35	1036.70	0.50	1.83	0.02350	0.043005	917.91	0.4604	0.0063427	0.63427	1.30868	1.25	1.27762
85	30.15	1015.90	0.45	1.82	0.02190	0.039858	1011.30	0.50724	0.0058786	0.58786	1.28243	1.13	1.18413
90	30.00	996.20	0.45	1.82	0.02050	0.037310	854.58	0.42863	0.0055028	0.55028	1.25756	1.13	1.10843

Lampiran – 3

Data Hasil Pengukuran Variasi Sudut Buka pada Reynold's Number: 90.000

Sudut θ (°)	Freq	Putaran (RPM)	Torsi Statis (Nm)	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Watt)	Putaran Real (RPM)	TSR, λ	CoP	CoP (%)	N/No	T/To	CoP/ CoPo
Std	35.85	1034.20	0.50	1.83	0.03060	0.055998	955.00	0.39929	0.0047839	0.47839	-	-	-
0	40.10	2076.20	3.65	1.92	0.06580	0.126336	1782.40	0.74522	0.0107928	1.07928	2.00754	7.30	2.25607
5	39.80	2080.60	3.60	1.93	0.06600	0.127380	1754.10	0.73339	0.010882	1.0882	2.01180	7.20	2.27471
10	39.70	2111.00	3.55	1.92	0.06610	0.126912	1802.70	0.75371	0.010842	1.0842	2.04119	7.10	2.26635
15	39.45	2143.80	3.50	1.92	0.06670	0.128064	1862.70	0.7788	0.0109404	1.09404	2.07291	7.00	2.28692
20	39.25	2171.80	3.45	1.93	0.06830	0.131819	1908.20	0.79782	0.0112612	1.12612	2.09998	6.90	2.35398
25	38.80	2235.70	3.30	1.93	0.06920	0.133556	1921.10	0.80321	0.0114096	1.14096	2.16177	6.60	2.38500
30	38.40	2265.90	3.20	1.93	0.07230	0.139539	2011.80	0.84114	0.0119207	1.19207	2.19097	6.40	2.49184
35	38.30	2408.00	2.90	1.94	0.07610	0.147634	2137.40	0.89365	0.0126123	1.26123	2.32837	5.80	2.63640
40	37.70	2471.50	2.50	1.94	0.08050	0.156170	2187.80	0.91472	0.0133415	1.33415	2.38977	5.00	2.78883
45	37.45	2368.20	2.40	1.94	0.07960	0.154424	2152.20	0.89984	0.0131923	1.31923	2.28989	4.80	2.75765
50	37.30	2254.90	2.00	1.93	0.07360	0.142048	2003.00	0.83746	0.0121351	1.21351	2.18033	4.00	2.53665
55	37.05	1964.70	2.00	1.92	0.06510	0.124992	1857.20	0.7765	0.010678	1.0678	1.89973	4.00	2.23207
60	37.00	1840.10	1.50	1.91	0.05750	0.109825	1643.30	0.68707	0.0093823	0.93823	1.77925	3.00	1.96122
65	37.00	1710.40	1.20	1.89	0.05150	0.097335	1479.60	0.61862	0.0083153	0.83153	1.65384	2.40	1.73818
70	36.90	1525.90	1.15	1.87	0.04140	0.077418	1292.80	0.54052	0.0066138	0.66138	1.47544	2.30	1.38250
75	37.10	1378.10	1.00	1.86	0.03860	0.071796	1230.80	0.5146	0.0061335	0.61335	1.33253	2.00	1.28211
80	36.35	1317.20	0.70	1.86	0.03660	0.068076	1183.70	0.49491	0.0058157	0.58157	1.27364	1.40	1.21568
85	36.25	1311.40	0.60	1.85	0.03360	0.062160	1066.50	0.4459	0.0053103	0.53103	1.26803	1.20	1.11003
90	36.20	1309.10	0.50	1.85	0.03280	0.060680	1141.30	0.47718	0.0051838	0.51838	1.26581	1.00	1.08360

Lampiran – 4

Data Hasil Pengukuran dengan Variasi Bilangan Reynolds

Reynolds Number	Freq.	Putaran (RPM)	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Watt)	CoP	CoP (%)
50,000	20.80	1032.8	1.88	0.0308	0.0579	0.02884	2.88378
55,000	22.35	1114.2	1.89	0.0351	0.06634	0.02480	2.48041
65,000	25.55	1384.0	1.92	0.0456	0.08755	0.01987	1.98716
70,000	27.55	1514.5	1.94	0.0525	0.10185	0.01850	1.84962
75,000	30.45	1710.0	1.96	0.0596	0.11682	0.01724	1.72378
80,000	32.20	1859.8	1.97	0.0656	0.12923	0.01575	1.57452
85,000	34.70	1991.3	1.98	0.0722	0.14296	0.01451	1.45122
90,000	36.10	2108.7	1.99	0.0772	0.15363	0.01313	1.3131
95,000	38.25	2325.8	2.00	0.0844	0.1688	0.01226	1.22617
100,000	40.55	2467.8	2.01	0.0901	0.1811	0.01130	1.12971



BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Dari analisa yang telah dilakukan mengenai pengaruh penambahan plat datar pengganggu di depan sudu *returning* pada turbin angin Savonius terhadap performa turbin angin, didapatkan beberapa kesimpulan diantaranya adalah:

1. Pemberian plat datar pengganggu di depan *returning blade* turbin angin tipe Savonius dengan $L/D = 1,3054$ pada bilangan Reynolds 60.000, 75.000 dan 90.000 dapat meningkatkan performa dari turbin angin, yaitu peningkatan pada nilai putaran, torsi statis dan daya yang dihasilkan untuk sudut kemiringan $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$.
2. Plat datar pengganggu dengan $L/D = 1,3054$ paling optimum digunakan pada sudut bukaan (θ) = 40° dengan peningkatan putaran sebesar 263% dibandingkan dengan putaran pada turbin tanpa penghalang pada bilangan Reynolds 60.000.
3. Plat datar pengganggu dengan $L/D = 1,3054$ paling optimum digunakan pada sudut bukaan (θ) = 0° dengan peningkatan nilai torsi statis sebesar 730% dibandingkan dengan torsi statis pada turbin tanpa penghalang pada bilangan Reynolds 90.000.
4. Plat datar pengganggu dengan $L/D = 1,3054$ paling optimum digunakan pada sudut bukaan (θ) = 40° dengan peningkatan nilai *coefficient of power* sebesar 460% dibandingkan dengan *coefficient of power* pada turbin tanpa penghalang pada bilangan Reynolds 60.000.

5.2. Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan antara lain adalah:

1. Pada pengujian ini, perbandingan besar benda uji terhadap *wind tunnel* yang digunakan kurang



- diperhitungkan sehingga untuk penelitian selanjutnya diharapkan untuk memperhitungkan hal tersebut agar didapatkan hasil yang optimal.
2. Pengukuran daya output turbin pada penelitian ini menggunakan motor listrik, sehingga hasil yang didapatkan akan dipengaruhi oleh efisiensi dari motor listrik. Untuk itu diharapkan pada penelitian selanjutnya untuk dapat melakukan cara lain dalam pengukuran daya.
 3. Pengukuran torsi yang dilakukan sebaiknya menggunakan torsi dinamis agar dapat ditemukan hubungan antara nilai putaran, nilai torsi dan nilai *coefficient of power* dari turbin angin Savonius.

DAFTAR PUSTAKA

- Altan, B.D. dan Atilgan, M. 2010. **The Use of a Curtain Design to Increase the Performance Level of a Savonius Wind Rotors**. Journal Renewable Energy, Vol. 35, Page 821-829.
- Altan, B.D. Atilgan, M. Aydoğan, O. 2008. **An Experimental Study on Improvement of a Savonius Rotor Performance With Curtaining**. Journal Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 32, Page 1673-1678.
- Fox Robert W., McDonald, Alan T. 2011. **Introduction to Fluid Mechanics**. John Wiley & Sons, Inc: New York.
- Mohamed M.H., Janiga G., Pap E., Thèvenin D. 2011. **Optimal Blade Shape of a Modified Savonius Turbine Using an Obstacle Shielding the Returning Blade**. Journal Energy Conversion and Management, Vol. 52, Page 236-242.
- Y. Triyogi, D. Suprayogi, E. Spirda. 2009. **Reducing the Drag on a Circular Cylinder by Upstream Installation of an I-type Bluff Body as Passive Control**. Proc. ImechE Vol. 223, Part C: J. Mechanical Engineering Science.

RIWAYAT PENULIS



Ainun Nadhifah dilahirkan di Kota Surabaya, Jawa Timur pada tanggal 14 November 1992 dan merupakan anak pertama dari empat bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan Sekolah Dasar di SD Islam Al-Hikmah Surabaya (1999-2005), Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 22 Surabaya (2005-2008), Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 5 Surabaya (2008-2011) dan menempuh bangku perkuliahan di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi

Sepuluh Nopember Surabaya (2011-2016). Penulis mengambil bidang studi Konversi Energi, khususnya pada Laboratorium Mekanika dan Mesin-Mesin Fluida.

Selama berada pada bangku perkuliahan, penulis mengikuti organisasi yaitu Club Mesin ITS Autosport yang bergerak di bidang olahraga otomotif. Selain itu penulis juga tergabung dalam ITS *Solar Car Racing Team* serta Tim Mobil Listrik ITS yang melakukan berbagai inovasi pengembangan mobil listrik. Beberapa kegiatan kemahasiswaan yang pernah diikuti penulis sebagai panitia diantaranya adalah Mesin Rally and Gathering (2012), Mesin Latber Rally (2013 dan 2014 part I dan II), Mesin *Two Wheel Slalom* ITS (2013 dan 2014), *Indonesia Energy Marathon Challenge* (2012, 2013 dan 2014) serta *Mechanical City* (2013). Saat tergabung dalam ITS *Solar Car Racing Team*, penulis meraih 10th position dalam kompetisi bergengsi *World Solar Challenge* 2015 di Australia.